STIINTA PENTRU TOTI

78

GHEORGHE HUȚANU
JEAN DORIN

Holografia

Ştiinţa pentru toţi

Cunoştinţe despre univers

COLECȚIA „ȘTIINȚA PENTRU TOȚI"
apare sub egida
CONSILIULUI NAȚIONAL
AL
FRONTULUI UNITĂȚII SOCIALISTE

GHEORGHE HUȚANU • JEAN DORIN
doctor în fizică scriitor

Holografia

ȘTIINȚIFICĂ ȘI ENCICLOPEDICĂ

Coperta colecției: EUGEN KERRY

„O carte nu are rost decît dacă te învaţă ceva"

VOLTAIRE

ÎN LOC DE PREFAŢĂ

Dezvoltarea impetuoasă, explozivă a unora dintre ştiinţe precum şi a tehnicii, grefată pe unele ştiinţe, impune o permanentă informare atît a celor preocupaţi să fie la curent cu aceste progrese uluitoare, cît şi a celor ce se străduiesc să transpună în practică noile cuceriri.

Holografia constituind un domeniu cu totul nou, cu o arie de aplicare însă din ce în ce mai întinsă şi mai impresionantă, atît în ceea ce priveşte microcosmosul cît şi în ceea ce priveşte macrocosmosul, nu poate rămîne numai în tratatele sau revistele de specialitate, ori în manualele universitare.

Descoperirea holografiei demonstrează, o dată în plus, că fenomene existente în natură dintotdeauna au fost sesizate în treacăt fără a trage o concluzie constructivă şi, tocmai de aceea, în cuprinsul lucrării autorii s-au oprit şi asupra unor scurte biografii ale acelora care au marele merit că au sesizat fenomenele, au tras concluzii şi le-au fundamentat, stabilind pe baza lor legi şi principii în fizică.

Sperăm că introducerea unor elemente de ordin istoric şi biografic nu va fi interpretată ca o tendinţă [illegible] lucrarea cu lucruri inutile, ci, dimpotrivă, [illegible]voluţia în timp a unor idei şi a prezenta [illegible]ersonalităţile care au contribuit esen-

ţial la descoperirea fenomenelor care stau la baza holografiei şi a înţelegerii acestui nou domeniu.

Cititorii, desigur, îşi vor da seama că aceste cunoştinţe sînt rezultatul acumulărilor de secole, că multe dintre fenomenele descrise au fost observate, constatate de foarte mulţi oameni, dar nu le-au sesizat esenţa şi semnificaţia cuvenită. Întotdeauna a trebuit să se nască o minte luminată, uneori genială, pentru a le sintetiza şi transforma în legi sau principii, găsindu-le în acelaşi timp şi aplicaţiile practice interesante şi utile societăţii, oamenilor.

Holografia face parte din fizică, iar fizica este o ştiinţă a naturii, o ştiinţă practică, născută din observaţiile zilnice ale vieţii practice, sub imboldul permanent al omului de a-şi face viaţa mai frumoasă şi mai uşoară şi de a cuprinde necunoscutul.

Progresele multor altor ştiinţe sînt legate în cel mai înalt grad de fizică, de progresele ei, în sensul că o descoperire mai însemnată în fizică exercită influenţă asupra dezvoltării uneia sau alteia dintre ştiinţe, asupra progresului mai multora dintre ele, iar în unele cazuri dă naştere unor discipline noi.

Aşa, de exemplu, descoperirea microscopului cu contrast de fază şi a microscopului electronic a condus la descoperiri neaşteptate în biologie, în medicină.

Înţelegerea şi însuşirea elementelor de bază ale holografiei sînt condiţionate de înţelegerea şi de însuşirea altor cunoştinţe de fizică, cunoştinţe, care, am socotit, trebuie reamintite. De aceea, din dorinţa de a facilita cît mai mult înţelegerea şi însuşirea temelor propuse, am considerat foarte util să reîmprospătăm memoria cititorilor cu elementele strict necesare. În acest fel, nu vom risca să fim în situaţia din întîmplarea pe care o redăm mai jos.

Celebrul fizician german Max Born se[illegible] din zile, în vizită la o familie. La un[illegible]

să mediteze în liniște, savantul se retrase într-o firidă lîngă o fereastră. După scurt timp, dintre invitați se desprinse o doamnă distinsă, care se îndreptă către marele fizician și-l întrebă:

— Ați putea, maestre, să-mi spuneți în cîteva cuvinte în ce constă teoria relativității a lui Einstein?

— Desigur stimată doamnă, răspunse cu amabilitate savantul. Îmi este teamă însă să nu se repete întîmplarea petrecută mai demult, cu unul dintre prietenii mei.

— Dar ce s-a întîmplat?

— Într-o zi, ne plimbam prin oraș și, la un moment dat, l-am invitat într-un lacto-bar să sorbim cîte un pahar cu lapte.

— Lapte? se miră prietenul meu; ce-i ăla lapte?

— Un lichid alb, gustos, îi răspunsei eu.

— Alb? Ce-i aia alb? mă mai întrebă partenerul.

— N-ai văzut și tu o lebădă?

— Lebădă? Ce-i aia o lebădă?

— O pasăre mare cu gîtul îndoit.

— Gît îndoit? Cum vine asta?

— Uită-te bine la mîna mea; și îi arătai mîna mea îndoită.

— Ah, acuma înțeleg bine ce este laptele.

Dar și doamna a înțeles și, prezentîndu-și scuzele de rigoare, se retrase printre invitați.

Max Born (1882—1970), fizician german, profesor universitar la Göttingen și Edinburg, membru al Societății Regale din Londra, membru al Academiei de Științe a U.R.S.S.

Born are numeroase contribuții în dezvoltarea fizicii: în teoria relativității, în teoria cuantică, în teoria structurii atomului, în teoria rețelelor cristaline.

Born a fost un fizician teoretician de mîna întîia. În urma instaurării hitlerismului în Germania, a fost silit să emigreze în Anglia (1933). Acolo a scris valoroasa lucrare *Fizica atomică* a cărei apariție, în limba engleză, a avut loc în 1935. Au urmat [illegible] în 1969, opt ediții. A fost tradusă și în limba română [illegible]ura științifică, București, 1973). A scris, împreună [illegible]*scipiile opticii*, care a apărut în cîteva ediții.

A îmbrățișat concepțiile filozofice materialiste, dînd o interpretare, de pe aceste poziții, legilor mecanicii cuantice și a emis o serie de previziuni teoretice în dezvoltarea fizicii.

În anul 1954 a primit Premiul Nobel pentru fizică, pentru lucrări în domeniul mecanicii cuantice și interpretarea statistică a funcției de undă.

CE TREBUIE SĂ ŞTIM DESPRE UNDE

În natură, în tehnică, întîlnim cele mai diverse mişcări. Printre acestea, mişcările oscilatorii ocupă un loc deosebit. Dar ce sînt aceste mişcări? Pentru a da răspuns vom apela la cîteva exemple concretizate în figura 1 a, b, c. Un pendul simplu[1], scos din poziţia de echilibru şi lăsat liber, se mişcă un timp limitat, revenind în cele din urmă la poziţia sa de echilibru (punctul de suspensie şi centrul de greutate al sistemului se găsesc pe aceeaşi verticală). La fel se întîmplă cu o lamă elastică încastrată la o extremitate şi al cărei capăt liber este scos din poziţia de echilibru, sau cu un resort elastic suspendat şi scos din poziţia sa de echilibru. Mişcările tuturor corpurilor menţionate aici se repetă într-un anumit interval de timp, corpurile apropiindu-se treptat de poziţia lor de repaus.

Să ne imaginăm acum mişcarea unui piston al unei locomotive cu aburi; şi aceasta se repetă. La fel mişcarea clădirilor în timpul unui cutremur, mişcarea valurilor şi a arborilor datorită vîntului. Evident că şirul exemplelor de mişcare care se repetă poate continua oricît. Vom aduce în discuţie însă unele mişcări care se

[1] ...orp cu dimensiuni liniare neglijabil de mici, suspendat de ...il. Atît firul cît şi corpul au greutăţi neglijabil

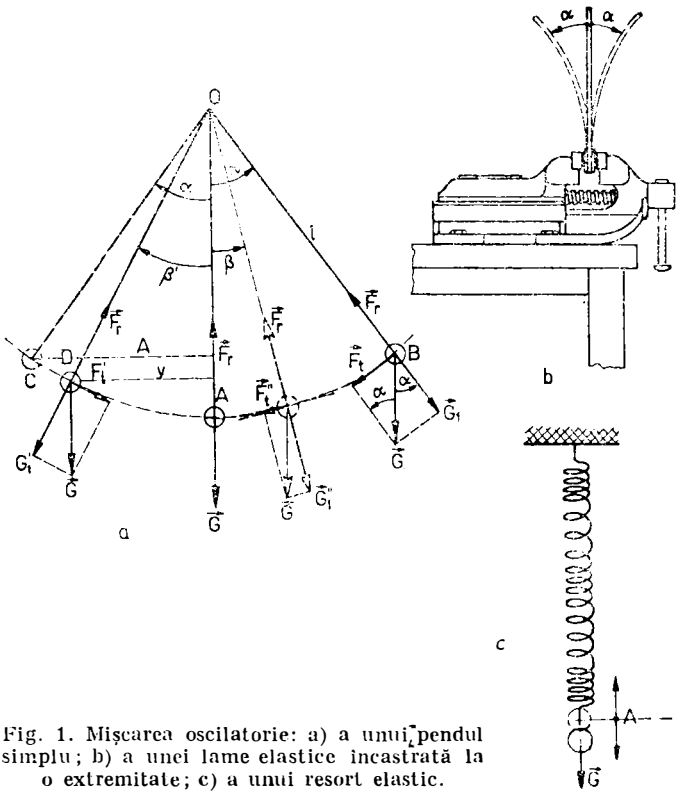


Fig. 1. Mişcarea oscilatorie: a) a unui pendul simplu; b) a unei lame elastice încastrată la o extremitate; c) a unui resort elastic.

repetă, existente atît în macrocosmos cît şi în microcosmos: mişcarea Lunii în jurul Pămîntului, a planetelor în jurul Soarelui, a electronilor în jurul nucleelor atomilor de care aparţin, a moleculelor într-un corp solid ş.a. Toate mişcările menţionate au ceva comun: *sînt periodice*. Dar între ele există deosebiri: aşa, de mişcarea pendulului se deosebeşte de aceea a moleculelor dintr-un corp solid. Pe

mișcările periodice au fost clasificate în: mișcări circulare, respectiv eliptice, mișcări oscilatorii, respectiv vibratorii, și mișcări ondulatorii. Mișcarea Lunii în jurul Pământului este o mișcare circulară, mișcarea electronilor în atom este eliptică, mișcarea pendulului simplu este oscilatorie, a lamei și a resortului elastic sînt vibratorii, iar mișcarea care se observă pe suprafața unei ape liniștite, în care s-a aruncat o piatră, este ondulatorie.

Mișcările sînt produse de forțe. De exemplu, în cazul mișcării Lunii, a planetelor, acționează o forță de atracție reciprocă care variază invers proporțional cu pătratul distanței dintre centrele corpurilor. Această forță le menține pe traiectorie. În cazul pendulului simplu acționează forța gravitațională și, prin componenta $\vec{F}_t$, întreține, un timp, mișcarea oscilatorie; în cazul lamei ori a resortului elastic reacțiunea elastică a materialului din care sînt confecționate și care în cazul resortului elastic se opune forței gravitaționale, face același lucru.

Componenta $\vec{F}_t$ se comportă ca o forță elastică și este numită, de aceea, *forță cvasielastică*.

Ambele tipuri de forțe, elastice și cvasielastice, produc același efect: readucerea corpului în poziția de echilibru (în natură toate corpurile tind către o stare în care energia potențială este minimă, aceasta fiind starea cea mai stabilă). Ambele forțe variază direct proporțional cu depărtarea față de poziția de echilibru și sînt dirijate în sens opus sensului creșterii depărtării. De aceea, mișcările pendulului, ale lamei elastice și ale resortului elastic se numesc *mișcări oscilatorii (vibratorii) armonice*.

Vibrațiile sînt produse de forțe propriu-zis elastice, în timp ce oscilațiile sînt produse de forțe cvasielastice. Din punct de vedere fizic, însă, ambele tipuri de mișcări oscilatorii și vibratorii, sînt identice.

[illegible]ie, se poate defini mișcarea oscilatorie ca [illegible] *alternativă între două poziții limită*,

poziții situate de o parte și de alta a poziției de echilibru; ea se caracterizează prin următoarele elemente importante.

Perioada, care înseamnă *timpul în care se efectuează o oscilație completă.* De exemplu, în cazul pendulului simplu, mișcarea din *B* în *C* prin *A* și înapoi în *B.* Perioada se măsoară în *secunde,* notîndu-se cu litera *T.* Se cunosc procese periodice care au perioada de ordinul nanosecundei (1 nanosecundă=a miliarda parte dintr-o secundă).

Frecvența este un alt element important și *reprezintă numărul de oscilații complete efectuate într-o secundă;* se notează cu *f* și se măsoară în *oscilații pe secundă.*

Perioada este inversul frecvenței ($T=\frac{1}{f}$), iar frecvența este inversul perioadei ($f=\frac{1}{T}$).

Elongația înseamnă *depărtarea oscilatorului la un moment dat față de poziția de echilibru* și se măsoară în *metri.* Elongația unghiulară se exprimă în *grade.*

Amplitudinea este *elongația* maximă și se măsoară în aceleași unități ca și elongația.

Faza mișcării oscilatorii este *o mărime ce caracterizează starea oscilatorului în orice moment;* se măsoară în *radiani* (un radian este egal cu 57°17′45″).

Să ne imaginăm un pendul fizic format dintr-o pîlnie suspendată de un cadru, printr-un fir (fig. 2). Așezăm cadrul pe o masă, iar sub pendul punem o fîșie de carton umed. Astupăm partea inferioară a pîlniei și turnăm în ea nisip. Scoatem dopul și imediat punem în stare de oscilație pendulul, trăgînd, în același timp, cu viteză constantă, fîșia de carton. Mișcarea pendulului trebuie să fie într-un plan perpendicular pe direcția de mișcare a cartonului. Nisipul ce cade din pîlnie se[illegible] pe carton după o curbă apropiată de ac[illegible] numită în matematică *sinusoidă.*

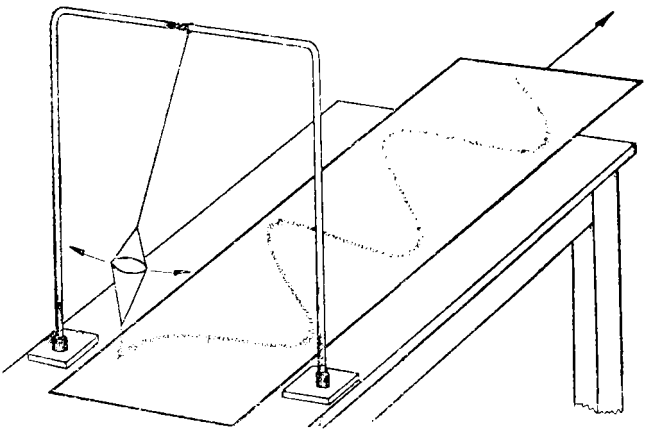


Fig. 2. „Autograful" unei mişcări oscilatorii (curba reprezintă o sinusoidă).

Curba aceasta reprezintă *„autograful" mişcării* şi se numeşte *diagrama mişcării oscilatorii*, sau *graficul mişcării oscilatorii.*

În figura 3, a şi b este reprezentat graficul unei mişcări oscilatorii în care amplitudinea se menţine constantă în timp. *Punctele M* şi *N*, sau *P* şi *Q*, oscilează în acelaşi timp, adică lor le corespund în acelaşi timp amplitudini de valoare maximă şi de acelaşi semn. Se spune că aceste puncte oscilează *în fază* sau în *concordanţă de fază.* Punctele *M* şi *P*, sau *N* şi *Q*, oscilează însă în *discordanţă de fază* sau în *opoziţie de fază* sau încă în *contrafază (antifază).*

Dar amplitudinea oscilaţiilor efectuate de un corp descreşte în timp din cauza frecărilor; de aceea, orice oscilator revine cu timpul la poziţia de echilibru stabil. [illegible] oscilaţii se numesc *oscilaţii amortizate* (fig. 4). [illegible]ilaţiile întreţinute îşi menţin amplitudinea

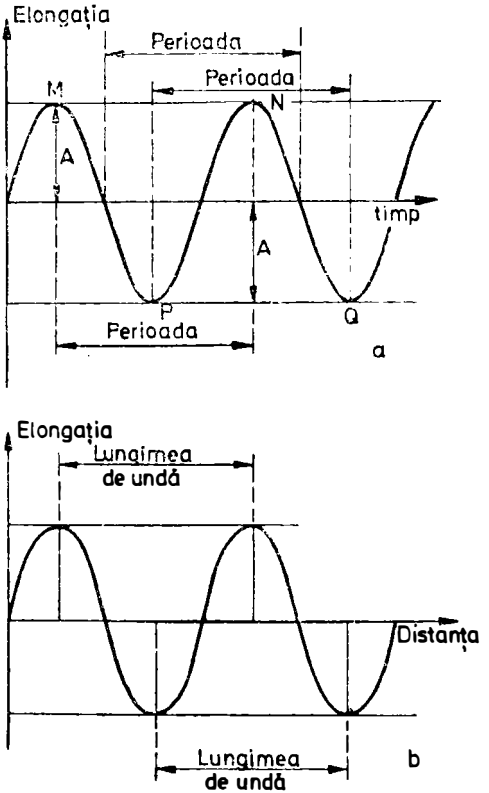


Fig. 3. Variația elongației în cazul unei mișcări oscilatorii neamortizate: a) variația în timp; b) variația cu distanța.

În figura 5, a se arăta compunerea a două oscilații în fază, adică oscilații ale căror amplitudini trec în aceleași momente prin valori maxime sau minime. Cu linie plină s-a desenat oscilația rezultantă, amplitudinea oscilației rezultante fiind egală cu suma a

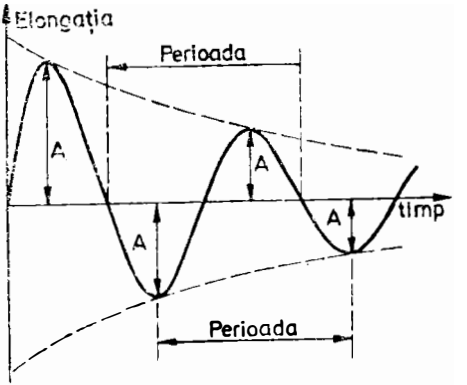
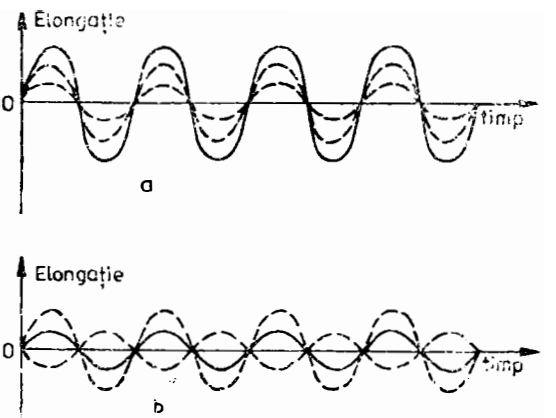


Fig. 4. Variația în timp a elongației în cazul mișcării oscilatorii amortizate.



5. Însumarea elongațiilor a două mișcări oscilatorii neamor- a) elongațiile au același sens; b) elongațiile au sensuri

laţiilor componente. Dacă oscilaţiile sînt în contrafază (antifază), ca în figura 5, b, amplitudinea rezultantă este egală cu diferenţa amplitudinilor. De aceea, curba oscilaţiei rezultante are altă formă.

În viaţa practică întîlnim multiple aplicaţii ale diverselor tipuri de mişcări ale corpurilor. Printre acestea, un loc deosebit îl ocupă mişcările oscilatorii sau vibratorii. De exemplu, pendulul fizic[1] are multe utilizări dintre care menţionăm: la ceasuri asigură mersul uniform al acestuia; la determinarea acceleraţiei gravitaţionale în orice loc. Dar nu putem să nu menţionăm şi faptul de mare importanţă că fizicianul Foucault a pus în evidenţă cu ajutorul pendulului, la Paris, în anul 1851, mişcarea de rotaţie a Pămîntului.

Jean Bernard Léon Foucault (1819—1868), fizician francez. A fost membru al Academiei de Ştiinţe din Paris. Are contribuţii în mecanică, electricitate şi optică. Este cunoscută celebra experienţă cu pendulul, care-i poartă astăzi numele (pendulul lui Foucault) prin care a evidenţiat rotaţia Pămîntului, experienţă efectuată în anul 1851, sub bolta Panteonului din Paris (Panteonul este un edificiu considerat monument naţional, în care sînt depuse rămăşiţele pămînteşti ale oamenilor iluştri). După un an (1852) a inventat giroscopul.

În electricitate a inventat un întrerupător care îi poartă numele şi a descoperit curenţii de inducţie în mase metalice care se rotesc într-un cîmp magnetic, denumiţi astăzi *curenţi Foucault* (curenţi turbionari).

În optică, a determinat în anul 1850 viteza luminii, în condiţii de laborator, dovedind cu acest prilej că viteza luminii în apă este mai mică decît viteza luminii în aer. A construit prima oglindă parabolică prin retuşarea unei oglinzi sferice.

Şi acum să ne aşezăm pe malul unei ape liniştite şi, din cînd în cînd, să aruncăm cîte o pietricică sau alte obiecte mici. Vom observa, cu plăcere, nişte cercuri concentrice, sub formă de adînciturі şi ridicături ale apei,

[1] Un corp suspendat, care poate să oscileze în j
axe orizontale care nu trece prin centrul de greutate c

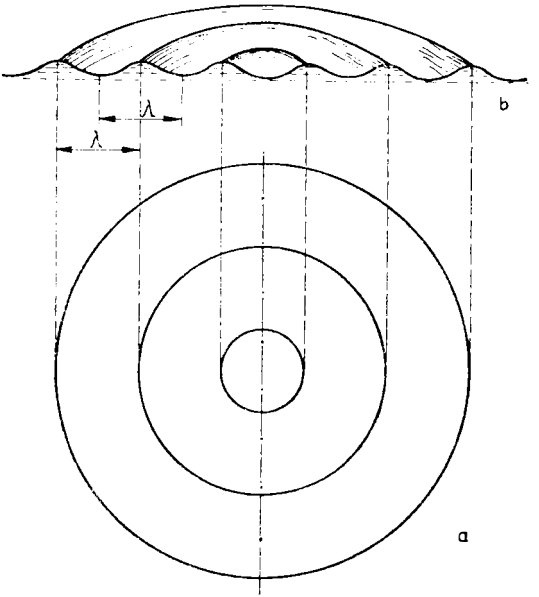


Fig. 6. Undele de suprafață (superficiale): a) unde care se observă atunci cînd pe suprafața liniștită a unui lichid se aruncă o piatră, un mic obiect; b) aspectul undelor de suprafață care s-ar vedea cînd am introduce un ecran transparent perpendicular pe suprafața lichidului.

centrate pe punctul în care a căzut obiectul aruncat (fig. 6, a).

Dacă am introduce în apă un ecran foarte subțire, transparent, perpendicular pe suprafața apei, am vedea ceea ce am reprezentat în fig. 6, b. Ridicăturile, denumite și *creste*, sînt mai ascuțite decît adînciturile, denumite *văi*. Fenomenul nu durează mult; suprafața apei revine la starea inițială, plană.

Dacă pe suprafața apei dintr-un vas am lăsa să cadă picături de apă la intervale scurte de timp, am observa

mereu acele cercuri concentrice care se propagă pe suprafaţa apei. În astfel de cazuri se spune că pe suprafaţa apei a luat naştere o undă. Aşadar, putem spune că unda reprezintă procesul de propagare a oscilaţiei într-un mediu elastic. În cazul descris undele se numesc *unde de suprafaţă.*

Revenind la figura 1, c, observăm că în timpul oscilaţiilor se produc comprimări şi descomprimări ale resortului. În lungul resortului se propagă *unde longitudinale*, care sînt însoţite de fenomenele menţionate.

Să prindem acum unul dintre capetele libere ale unei frînghii de un cui bătut într-un perete. Întindem frînghia şi la capătul liber imprimăm o mişcare în sus şi în jos. Vom observa că deformaţia nu rămîne localizată, ci se propagă în lungul frînghiei. Spunem că pe frînghie a luat naştere o undă. Ne dăm seama însă că în acest caz direcţia de oscilaţie a punctelor frînghiei este perpendiculară pe direcţia de propagare. De aceea, unda se numeşte *undă transversală* şi ea se propagă prin variaţii de formă ale mediului; *undele transversale nu se pot propaga decît prin medii solide.* Undele longitudinale însă se propagă prin orice fel de mediu, indiferent de starea sa de agregare. În toate cazurile descrise, nu se propagă substanţa, ci numai oscilaţia, din aproape în aproape. Astfel de mişcări se numesc *mişcări ondulatorii.*

Drumul străbătut de undă în timp de o perioadă se numeşte *lungime de undă* şi se notează cu λ[1]($\lambda = vT$). Cuvintele: *undă, lungime de undă, perioadă, frecvenţă, amplitudine* au intrat astăzi în limbajul cotidian al oamenilor, fie tineri, fie vîrstnici, indiferent de pregătirea pe care o au, mişcările ondulatorii întîlnindu-se pretutindeni. Propagarea sunetului, a undelor radio, a luminii, este o mişcare ondulatorie. O undă se reprezintă în desen ca o curbă asemănătoare unei sinusoide.

[1] Se citeşte lambda.

Cînd se produce un cutremur de pămînt, din focarul cutremurului (locul unde se produce) numit *hipocentru* se propagă în toate direcţiile, în pămînt, unde longitudinale şi transversale, iar din punctul de pe suprafaţa pămîntului, corespunzător hipocentrului şi denumit *epicentru*, se propagă unde de suprafaţă a căror viteză de propagare este egală cu 4 km/s. Viteza undelor transversale şi longitudinale creşte cu distanţa parcursă. Undele longitudinale se propagă cu viteze de 8—13 km/s, iar cele transversale cu viteza de 4—7 km/s. La o staţie seismică (unde se găsesc instalate aparate ce înregistrează seismele), ajung mai întîi undele longitudinale, apoi cele transversale şi la sfîrşit undele de suprafaţă. Din diferenţa dintre timpii de sosire a undelor longitudinale şi transversale se determină distanţa de la staţie la hipocentru şi, respectiv, la epicentru.

Dar să revenim la problemele ce ne interesează acum. Dacă undele întîlnesc un obstacol, se întorc în mediul prin care au trecut (mediu incident) dar pe altă direcţie; fenomenul se numeşte *reflexia undelor.*

Dacă suprafaţa obstacolului întîlnită de către unde este plană, atunci fenomenul se numeşte *reflexie regulată*, sau pe scurt *reflexie.* În cazul în care suprafaţa întîlnită este cu denivelări, fenomenul se numeşte *reflexie difuză*, sau *difuzia undelor.*

Cînd undele trec dintr-un mediu într-altul, mediile fiind adiacente (de exemplu, din aer în apă), ele îşi schimbă direcţia de propagare; fenomenul se numeşte *refracţia undelor.* În cele două medii viteza undelor are valori diferite.

Propagarea undei nu înseamnă deplasarea mediului după direcţia şi sensul de propagare, ci trecerea succesivă în stare de oscilaţie a particulelor ce alcătuiesc mediul elastic în care a fost provocată perturbaţia. De acest lucru ne putem convinge uşor în felul următor: pe suprafaţa apei, pe care provocăm unde, aruncăm un dop

de plută; vom observa că, în timpul producerii undelor, dopul oscilează, ridicîndu-se și coborînd, deplasîndu-se însă foarte puțin în plan orizontal.

Dacă undele sînt provocate într-un mediu omogen, atunci ele se propagă după toate direcțiile cu aceeași viteză, așa încît vor exista puncte ale mediului care se vor găsi în aceeași fază de mișcare. Aceste puncte vor fi egal depărtate de locul în care a fost provocată perturbația (se numește centru de oscilație). Ele determină o suprafață care se numește *suprafață de undă*. Cea mai depărtată suprafață de undă se numește *front de undă*. Direcția perpendiculară pe suprafața de undă se numește *rază de propagare*.

În medii omogene undele se propagă cu viteză constantă, iar suprafețele de undă sînt sfere concentrice, centrate pe locul în care a fost provocată perturbația. Undele care se găsesc la distanță mare de centrul de oscilație devin unde plane.

Să considerăm un vas mare de apă și în el să introducem un cilindru de carton (fig. 7) sau tablă prevăzut cu foarte multe orificii practicate după o circumferință. Așezăm cilindrul în așa fel încît centrele orificiilor să se găsească pe suprafața liberă a apei. În interiorul cilindrului, în lungul axei sale, lăsăm să cadă, dintr-o pipetă, picături de apă, la scurte intervale de timp. Se vor provoca astfel, pe suprafața apei, în repetate rînduri, unde de suprafață, așa cum am arătat în figura 6. Vom observa, nu fără surprindere, că din dreptul fiecărui orificiu se propagă unde de suprafață ca și cum orificiile ar fi ele însele centre de oscilație. Acestea sînt așa-numitele *unde secundare*, iar suprafața tangentă la aceste unde, numită *înfășurătoarea lor*, reprezintă unda următoare care se propagă. Unda continuă să se propage chiar dacă am încetat la un moment dat să lăsăm să cadă picături.

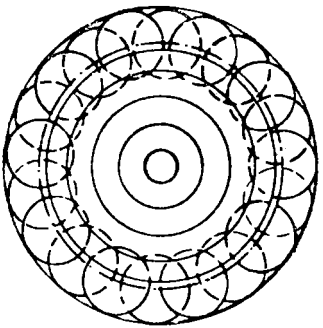


Fig. 7. Pentru înțelegerea principiului lui Huygens.

Această experiență ne sugerează faptul că *fiecare punct de pe o suprafață (front) de undă este el însuși un nou centru de unde secundare, iar înfășurătoarea lor reprezintă noua suprafață (noul front) de undă.* Această concluzie exprimă un principiu foarte important în fizică, numit *principiul lui Huygens*, după numele fizicianului care l-a formulat pentru întîia oară. Vom reveni asupra acestui principiu la p. 22—23.

O experiență asemănătoare se poate face pentru cazul undelor plane.

Christiaan Huygens (1629—1695), fizician, matematician și astronom olandez. Are lucrări în diverse domenii ale fizicii. Consacrarea în fizică i-a adus-o teoria ondulatorie a luminii și principiul ce-i poartă numele, principiu completat ulterior de către Fresnel și devenit un principiu fundamental în optică. În anul 1673 a elaborat teoria oscilațiilor pendulului și teoria forțelor centrifuge.

Lui Huygens îi aparține perfecționarea lunetei astronomice. În anul 1655 a descoperit unul dintre sateliții planetei Saturn, denumit Titan, și apoi nebuloasa din constelația Orion. A mai descoperit și mișcarea de rotație a planetei Marte.

A scris *Tratat despre lumină*, publicat în 1690, în care a expus teoria sa cu privire la natura luminii, principiul ce-i poartă azi

numele și explicarea fenomenului de reflexie și de refracție a undelor.

În domeniul matematicii a scris lucrări de geometrie, primul tratat de calculul probabilităților ș.a.

Să facem acum o experiență asemănătoare întrucîtva cu precedenta. În același vas cu apă din figura 7, presupus a avea suprafața suficient de mare, pentru a evita cît mai mult undele care se reflectă pe pereți, introducem acum un carton în care am făcut două orificii mici și apropiate, S_1 și S_2 (fig. 8, a și b). În partea din stînga a vasului, cum privim desenul, aducem un stativ în care am fixat pipeta și lăsăm să cadă din cînd în cînd picături pe suprafața apei din vas. Dincolo de carton se va observa ceea ce se vede în figură, deoarece fiecare deschidere, conform principiului lui

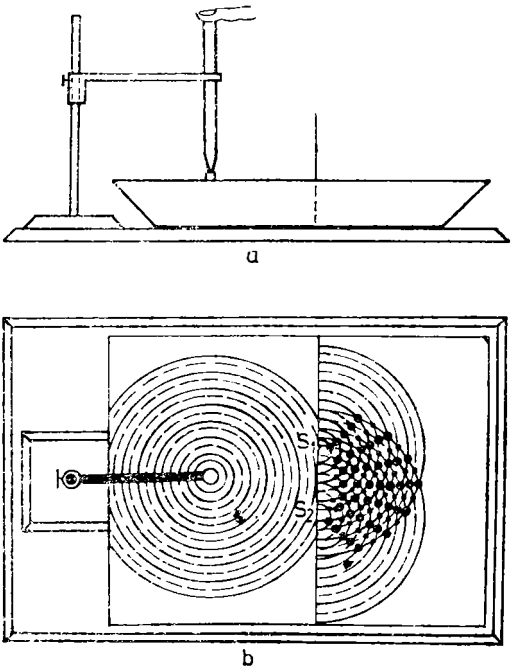


Fig. 8. Experienţă pentru explicarea interferenţei undelor de suprafaţă: a) vedere laterală; b) vedere de deasupra. Petele negre reprezintă *maximele* de oscilaţie, punctele reprezintă *minimele* de oscilaţie.

Huygens, devine un centru de oscilaţii de la care se propagă unde pe suprafaţa apei. Cele două serii de unde se întîlnesc şi se compun dînd naştere, în regiunea de întîlnire, la maxime şi minime de oscilaţie. Aceste oscilaţii au aceeaşi perioadă şi deci aceeaşi frecvenţă. Fenomenul acesta, de *întîlnire şi compunere a undelor care dau naştere la maxime şi minime de oscilaţie*, se numeşte *interferenţa undelor*, iar regiunea în care se

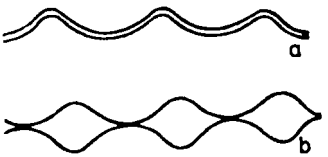


Fig. 9. Interferența undelor de suprafață: a) constructivă; b) distructivă.

întîlnesc și se compun undele se numește *cîmp de interferență*. În locurile în care apar maxime de oscilație, amplitudinile celor două serii de unde se adună; se spune că acolo are loc o *interferență constructivă*. Aceasta se întîmplă acolo unde se întîlnesc creste cu creste și adîncituri cu adîncituri (fig. 9, a). Amplitudinile celor două unde sînt egale (undele provin de la același izvor) și deci maximele rezultante vor avea amplitudinea egală cu de două ori amplitudinea unei unde. În locurile în care se întîlnesc însă creste cu adîncituri (fig. 9, b), amplitudinile se scad și deci acolo vor exista minime de oscilație. În cazul acesta, așa cum am arătat, amplitudinile sînt egale și deci amplitudinea rezultantă este nulă. În locurile respective ale cîmpului de interferență, apa va sta în repaus. În aceste locuri se spune că are loc o *interferență distructivă*.

Pentru ca fenomenul de interferență să se producă și să se observe trebuie întotdeauna ca undele care interferă să îndeplinească următoarele condiții: să fie *coerente*, adică să provină de la centre de oscilații (izvoare sau surse) care oscilează cu o diferență de fază constantă în timp; între undele ce interferă trebuie să existe, pînă la locul considerat din cîmpul de interferență, o diferență de drum, iar undele să aibă aceeași frecvență. În experiența descrisă, toate aceste condiții sînt îndeplinite.

Dacă pînă într-un punct al cîmpului de interferenţă diferenţa de drum (dintre drumurile parcurse de cele două unde) este un număr par de semilungimi de undă ($\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}, k=1, 2, 3, \ldots$) atunci punctul respectiv oscilează cu amplitudine maximă, iar dacă diferenţa de drum este egală cu un număr impar de semilungimi de undă ($\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$) atunci punctul considerat oscilează cu amplitudine minimă. În cazul în care amplitudinile undelor sînt egale, ca în cazul experienţei descrise, punctul considerat stă în repaus, deoarece amplitudinea rezultantă este nulă (aceasta are loc acolo unde se întîlnesc o creastă cu o adîncitură). În figura 8, b au fost desenate cu linii pline crestele şi cu linii întrerupte adîncîturile, cu puncte fine minimele de oscilaţie (în acest caz nule) şi cu pete negre, maximele de oscilaţie.

Să ne imaginăm experienţa următoare (fig. 10): un diapazon este fixat pe o scîndură; de un braţ al acestuia şi de o vergea verticală este legată o sfoară bine întinsă. Punînd în stare de vibraţie diapazonul, pe sfoară se va observa ceea ce arată figura 10. Ce s-a întîmplat? Undele reflectate de vergea întîlnindu-se cu undele incidente au dat naştere la un fenomen de interferenţă cu *unde staţionare*. Maximele de vibraţie se numesc *umflături* sau *ventre*, iar minimele, *noduri*. Distanţa dintre noduri sau dintre ventre este constantă,

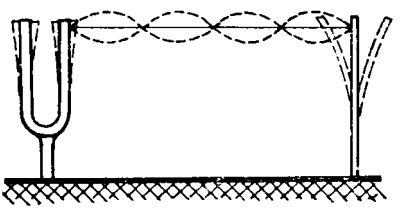


Fig. 10. Fenomen de interferenţă cu unde staţionare.

ambele distanţe fiind egale între ele. De aceea, astfel de unde se numesc *unde staţionare*. Distanţa dintre două ventre sau două noduri succesive este egală cu o jumătate de lungime de undă.

Cele expuse aici sînt valabile şi pentru undele luminoase, aşa cum vom arăta mai departe.

Propagarea undelor se face după o linie dreaptă, numită *rază de propagare*, atîta timp cît în drumul lor

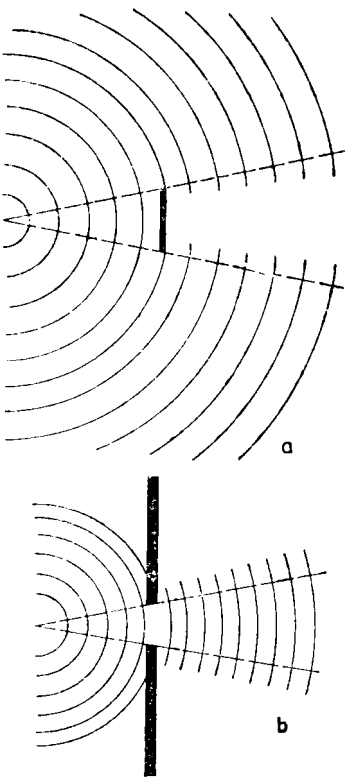


Fig. 11. Fenomen de difracţie a undelor: a) în cazul unui mic disc; b) în cazul unei deschideri practicată într-un ecran.

undele nu întîlnesc un obstacol. Dacă însă întîlnesc un obstacol, de exemplu, un disc cu dimensiuni liniare mai mici decît lungimea de undă a undelor, atunci acesta intră şi el în oscilaţie.

Însă în cazul în care dimensiunile discului sînt comparabile cu lungimea de undă, propagarea undelor se face ca în figura 11, a. Dacă în locul discului este o deschidere practicată într-un ecran, deschiderea avînd dimensiuni mai mici decît lungimea de undă, propagarea undelor se face ca în figura 11, b. Se observă că în cazurile menţionate undele se abat de la propagarea rectilinie. Undele ocolesc obstacolele întîlnite. Fenomenul se numeşte *difracţia undelor* şi-l vom întîlni şi la undele luminoase.

CE TREBUIE SĂ ŞTIM DESPRE LUMINĂ

Toate substanţele existente în natură sînt alcătuite din molecule, iar acestea, la rîndul lor, sînt formate din unu, doi sau mai mulţi atomi. Nici moleculele şi nici atomii nu pot fi văzuţi realmente cu nici un aparat. Ei pot însă fi văzuţi cu „ochii" raţiunii.

Substanţele alcătuite dintr-o singură specie de atomi se numesc *substanţe simple* sau *elemente*, iar substanţele avînd în componenţa lor două sau mai multe specii de atomi se numesc *substanţe compuse*. Hidrogenul, oxigenul, fierul pur, aurul pur etc. sînt elemente. Acidul clorhidric, aerul, apa ş.a. sînt substanţe compuse.

Atomul este cea mai mică parte dintr-un element; ei păstrează proprietăţile acestuia şi este alcătuit dintr-un nucleu şi un înveliş electronic. Nucleul cuprinde două feluri de particule elementare (fundamentale): *protoni* încărcaţi cu electricitate pozitivă şi *neutroni*, neîncărcaţi electric. Aşadar, nucleul în totalitatea sa este încărcat electric pozitiv. Numărul de protoni din nucleu este egal cu numărul de electroni din învelişul electronic. Cum aceştia sînt încărcaţi cu electricitate negativă, rezultă că, din punct de vedere electric, atomul este neutru.

Între nucleu şi electroni se exercită permanent o forţă de atracţie care scade cu pătratul distanţei dintre

nucleu şi electroni. Aceasta înseamnă că electronii mai depărtaţi de nucleu sînt mai „slab legaţi" de acesta.

Să ne amintim acum o experienţă simplă de la şcoală: un baston de ebonită, sticlă sau ceară roşie, frecat cu o bucată de mătase sau lînă, ori blană de iepure sau de pisică, capătă proprietatea de a atrage corpuri uşoare: bucăţi mici de hîrtie, fire de păr tăiate mărunt ş. a. Se spune că bastonul respectiv s-a electrizat, adică s-a încărcat cu electricitate. Dar proprietatea de a atrage corpuri uşoare se manifestă în jurul bastonului numai pe o anumită regiune din spaţiu. Dacă bastonul nu este electrizat, evident că nu se observă nimic deosebit. Aceasta înseamnă că în prezenţa bastonului electrizat mediul din jurul său şi-a schimbat proprietăţile. Se spune că în mediul din jurul bastonului s-a creat un *cîmp electric*. Aşadar, în jurul oricărui corp electrizat există un cîmp electric. Dacă corpul este imobil, cîmpul este constant în timp şi se numeşte *cîmp electrostatic*. Dacă corpul este în mişcare sau încărcarea sa electrică variază în timp, atunci cîmpul electric este variabil în timp.

Cîmpul electric este caracterizat în fiecare punct printr-o mărime fizică numită *intensitatea cîmpului electric* şi se notează cu $\vec{E}$ (este o mărime vectorială). Cu cît un punct este mai depărtat faţă de corpul (particula) ce creează cîmpul electric, cu atît intensitatea cîmpului este mai mică în punctul respectiv şi invers, cu cît punctul este mai apropiat, cu atît intensitatea cîmpului electric este mai mare (în cazul cîmpurilor electrostatice).

În mod perfect similar stau lucrurile în cazul magneţilor. În jurul oricărui magnet există un *cîmp magnetic* care poate fi static sau variabil în timp. Ca şi cîmpul electric, cîmpul magnetic este definit în fiecare punct printr-o mărime fizică vectorială numită *intensitatea cîmpului magnetic* ($\vec{H}$).

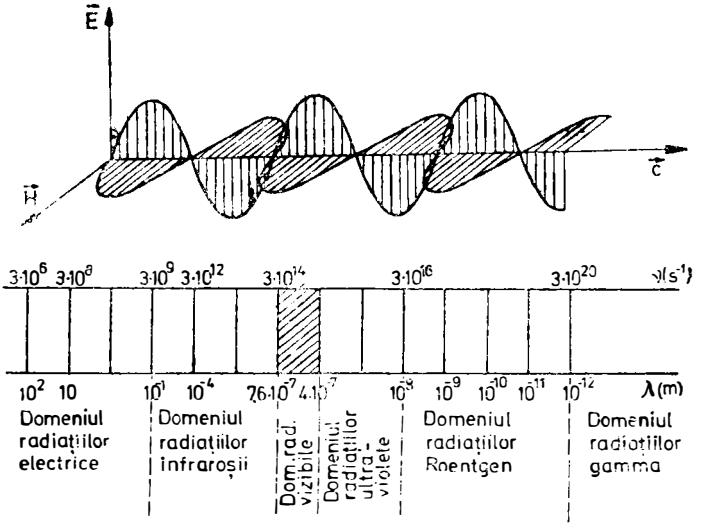


Fig. 12. Unde electromagnetice: a) forma sub care se propagă; b) gama undelor electromagnetice.

În cazul conductorilor prin care trec curenți electrici, se creează în jurul lor *un cîmp magnetic* și intensitatea cîmpului magnetic într-un punct este invers proporțională cu distanța de la axa conductorului pînă la punctul respectiv.

Ambele cîmpuri, electric și magnetic, variabile în timp, alcătuiesc ceea ce se numește *un cîmp electromagnetic*. Cîmpul electromagnetic se propagă în mediul în care este produs prin unde numite *unde electromagnetice* și care, în anumite condiții, au formă sinusoidală (fig. 12, a).

Undele electromagnetice sînt *unde transversale* și în vid ele se propagă cu viteza fantastică de 300 000 km/s, adică cu viteza cu care se propagă lumina.

Undele electromagnetice se reflectă și se refractă întocmai ca și lumina. Aceste proprietăți și altele care nu au fost menționate aici au condus la concluzia că *lumina este o undă electromagnetică*. Experiențe numeroase au confirmat aceasta.

În final, s-a stabilit în mod neîndoielnic existența gamei undelor electromagnetice (fig. 12, b). Ea cuprinde domeniul radiațiilor electrice, domeniul radiațiilor infraroșii, domeniul vizibil, domeniul radiațiilor ultraviolete, domeniul radiațiilor Röntgen și domeniul radiațiilor gamma. Se observă că luminii[1] îi revine un loc extrem de îngust. Radiațiile din acest domeniu sînt singurele percepute de simțul vizual al omului. Undele electromagnetice însoțesc întotdeauna o particulă care are numai masă de mișcare și care se numește *foton*. Energia unui foton este numită *cuantă de energie*.

În anul 1801, fizicianul englez Young a făcut o experiență interesantă, care a condus în final la lămurirea enigmei lui Grimaldi: lumină + lumină = întuneric. Dar să ne explicăm. În figura 13 este arătată schema experienței; se observă o oarecare analogie cu aceea din figura 8. Așa cum se vede, instalația constă dintr-o sursă de lumină în fața căreia se așază un filtru optic (sticlă colorată care lasă să treacă lumina de o singură lungime de undă, o singură culoare), un ecran, E_1 cu o deschidere foarte fină, și unul, E_2, cu două deschideri la fel de fine. Conform principiului lui Huygens, deschiderile S_1, S_2, S_3 devin noi izvoare de unde luminoase. În spațiul dintre E_2 și E_3 se produce fenomenul de interferență, iar pe ecranul E_3 se observă un ansamblu de franje (benzi) alternativ luminate și întunecate; sînt *franje de interferență*.

[1] Prin lumină se înțelege orice radiație din domeniul vizibil al spectrului.

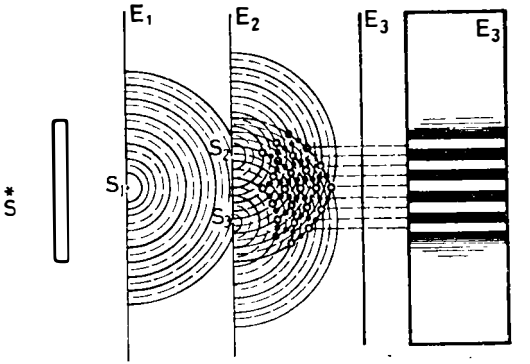


Fig. 13. Fenomenul de interferență a luminii obținut cu ajutorul experienței lui Young.

Cu puncte negre am notat locurile în care undele ajung în antifază și deci are loc o interferență distructivă; pe ecran se observă o franjă întunecată. Deci, lumină + lumină = întuneric.

Am notat cu cercuțe locurile în care undele ce interferă ajung în fază și deci are loc o interferență constructivă: lumină + lumină = lumină.

Francesco Maria Grimaldi (1618—1663), fizician și astronom italian. Profesor universitar la Bologna. Are studii în domeniul interferenței și dispersiei luminii ce vine de la soare, a descoperit fenomenul de difracție a luminii. Alte lucrări în domeniul astronomiei.

După anul 1802, au fost făcute numeroase experiențe de interferență a luminii cu alte instalații tot mai perfecționate. Întotdeauna au fost confirmate rezultatele lui Young.

Thomas Young (1773—1829), fizician și medic englez. A fos profesor universitar la Londra. Are numeroase lucrări în diverse domenii ca: fizică, tehnică, fiziologie, botanică, medicină, filologie ș.a.

În fizică are contribuții în mecanică și în optică. În mecanică este cunoscut modulul lui Young (modulul de elasticitate), care caracterizează elasticitatea corpurilor. În optică, a dezvoltat teoria ondulatorie a luminii pe baza căreia a interpretat, în anul 1801, fenomenul de interferență a luminii. Young a definit noțiunea de „coerență" a undelor și termenul de „energie". Tot el a descris pentru întîia oară un defect al ochiului numit *astigmatism*. Opera principală a lui Young este „Teoria luminii și a culorilor".

Dacă ținem seama de cele ce am spus pînă aici, vom defini *interferența luminii* ca *fenomenul de întîlnire și compunere a undelor luminoase dînd naștere în cîmpul de interferență la franje alternativ luminate și întunecate.*

Condițiile ce trebuie îndeplinite sînt aceleași cu acelea pe care le-am dat mai sus la interferența undelor

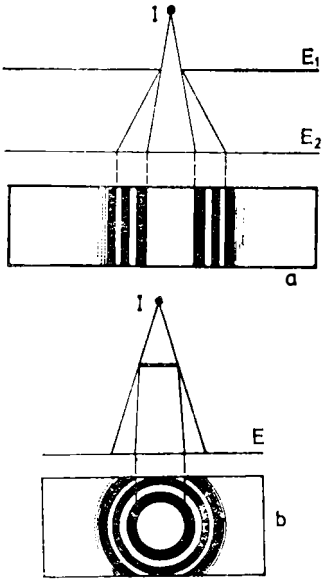


Fig. 14. Fenomenul de difracție a luminii: a) cazul unei fante foarte înguste (lungimea fantei trebuie să fie de cel puțin 100 de ori mai mare decît lărgimea ei); b) cazul unui disc opac avînd dimensiuni transversale liniare foarte mici.

mecanice, numai că aici diferența de drum se numește *diferență de drum optic*, drumul parcurs de lumină într-un mediu depinzînd de proprietățile optice ale mediului.

Cunoaștem cu toții că în medii obișnuite lumina se propagă în linie dreaptă. Există totuși situații în care apar abateri de la această lege a naturii. De exemplu, cînd lumina întîlnește obstacole, le ocolește.

În fața unei surse de lumină să plasăm un ecran opac în care, în prealabil, am făcut o deschidere foarte mică, dreptunghiulară, cu lărgimea de cel puțin 1/100 din lungimea ei[1] (fig. 14, a). Pe ecranul E_2 nu vom obține imaginea fantei, așa cum ne-am aștepta, în condițiile

[1] O astfel de deschidere, în fizică, se numește *fantă*.

propagării rectilinii a luminii, ci o pată luminată sau întunecată, în funcție de poziția ecranului E_2, limitată de franje alternativ luminate și întunecate. Cu alte cuvinte, se observă că lumina pătrunde în locul în care pe E_2 ar fi trebuit să fie umbra lui E_1.

Dacă în locul ecranului E_1 așezăm un mic disc opac, se observă pe ecranul E_2 (fig. 14, b) o pată luminată înconjurată de franje alternativ luminate și întunecate. Și aici, ca și în cazul precedent, franjele sînt tot mai estompate. Și aici se observă că lumina ocolește obstacolul întîlnit, sau că pătrunde în umbra geometrică a corpului întîlnit (în cazul al doilea, de exemplu, în locul unei umbre, pe ecranul E_2, care ar trebui să fie imaginea discului opac, se observă o pată luminoasă).

Acest fenomen se numește *difracția luminii* și are multiple aplicații în practică la fel ca și interferența luminii.

Am vorbit mai înainte (pagina 21) despre principiul lui Huygens. El rămîne valabil și aici, dar numai cu completarea făcută de către Fresnel: *noul front de undă* (*noua suprafață de undă*) este *rezultatul interferenței undelor secundare*. De aceea, înfășurătoarea lor are o intensitate apreciabilă. Făcînd această completare, Fresnel dă și o altă formulare principiului lui Huygens, rezultînd un nou principiu, care poartă numele celor doi fizicieni și care a devenit un principiu fundamental în fizică. Să vedem însă în ce constă principiul lui Huygens-Fresnel, principiu folosit în holografie.

Augustin Jean Fresnel (1788—1827), fizician francez. Fresnel are lucrări fundamentale în optică. A completat principiul lui Huygens, devenit *principiul Huygens-Fresnel*, principiu fundamental în optică. A pus bazele opticii ondulatorii prin contribuțiile sale remarcabile. Sînt cunoscute: oglinzile lui Fresnel, biprisma lui Fresnel, cu ajutorul cărora a evidențiat fenomenul de interferență a luminii. De asemenea, are lucrări în legătură cu fenomenul de dublă refracție a luminii și cu fenomenul de polarizare a luminii, de exemplu, fenomenul de interferență a luminii polarizate (împreună cu Arago).

Să ne imaginăm un izvor de lumină punctual, *I*, în interiorul unei suprafețe de undă *S* (fig. 15) și un punct *M* în spațiul în care vrem să cunoaștem intensitatea luminoasă. Se poate proceda în două moduri: a) conside-

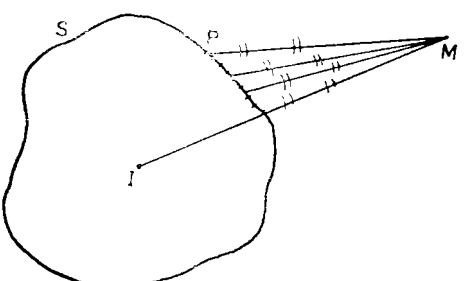


Fig. 15. Pentru explicarea principiului lui Huygens-Fresnel.

rînd numai izvorul luminos *I* sau, b) considerînd numai suprafaţa de undă. Într-adevăr, suprafaţa de undă ne-o putem imagina formată dintr-o infinitate de izvoare de lumină, infinit de mici, de la care pleacă unde secundare şi care se întîlnesc şi se compun, dînd naştere unui fenomen de interferenţă (fig. 15). Ca urmare, intensitatea luminoasă în punctul *M* va depinde de rezultatul interferenţei acestor unde. Altfel spus, intensitatea luminoasă în *M* rezultă din contribuţia globală a undelor secundare. Aşadar, se poate obţine intensitatea luminoasă în punctul *M*, considerînd numai suprafaţa *S* ca o suprafaţă luminoasă alcătuită dintr-o infinitate de izvoare de lumină. Izvoarele virtuale *P*, de pe suprafaţa *S*, sînt toate în fază şi au aceeaşi amplitudine ca şi oscilaţia luminoasă sosită din *I*. Cu această pregătire preliminară, putem enunţa principiul lui Huygens-Fresnel: *Într-un punct M al spaţiului, intensitatea luminoasă datorită izvorului luminos I este rezultatul interferenţei undelor secundare emise de izvoarele virtuale de pe suprafaţa S.*

Cînd un fascicul de lumină întîlneşte suprafaţa de separare a două medii adiacente, de exemplu, aerul şi apa dintr-un vas, aerul şi sticla de la geam ş. a., se produc simultan două fenomene: *de reflexie* şi *de refracţie* (fig. 16). Ambele fenomene decurg după legi precise, din care vom reaminti numai pe cele ale reflexiei: 1) raza incidentă, raza reflectată şi perpendiculara (normala) la suprafaţa reflectantă în punctul de incidenţă, *I*, sînt în acelaşi plan; 2) unghiul de reflexie este egal cu unghiul de incidenţă. Unghiurile se măsoară de la perpendiculara (normala) în punctul *I;* cînd unghiul de incidenţă este egal cu zero, unghiul de reflexie este şi el egal cu zero.

Înseamnă că un fascicul sau o rază de lumină care ar ajunge pe o oglindă după direcţia normalei s-ar reflecta pe acelaşi drum (orice suprafaţă lucie reflectă

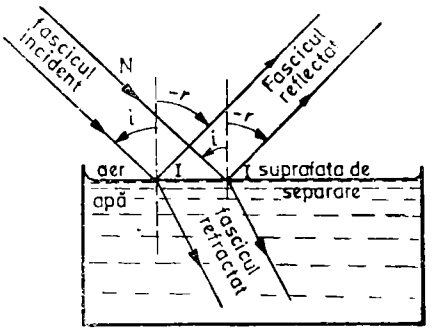


Fig. 16. Producerea simultană a fenomenelor de reflexie şi de refracţie, atunci cînd un fascicul îngust de lumină întîlneşte suprafaţa de separare a două medii adiacente cu proprietăţi optice diferite.

lumina şi se numeşte *oglindă*). Dacă suprafaţa întîlnită de lumină prezintă neuniformităţi, atunci lumina este difuzată, adică razele de lumină ale unui fascicul de lumină paralel, incident, nu mai sînt, după reflexie, paralele între ele.

Un mediu transparent, refringent, limitat de suprafeţe plane neparalele, se numeşte *prismă*. Din punct de vedere geometric este o prismă cu baza un triunghi. În figura 17 se vede mersul unei raze de lumină. Se observă că intrînd în prismă raza de lumină se refractă, apropiindu-se de baza prismei şi, continuîndu-şi în mod firesc drumul, la ieşirea din prismă raza emergentă este deviată înspre direcţia bazei prismei, astfel că imaginea punctului M este văzută de ochi în prelungirea razei emergente, adică în M'.

Un mediu transparent, refringent, limitat de două suprafeţe sferice sau de o suprafaţă sferică (cilindrică) şi una plană reprezintă ceea ce se numeşte o *lentilă*. Lentilele pot fi convergente sau divergente.

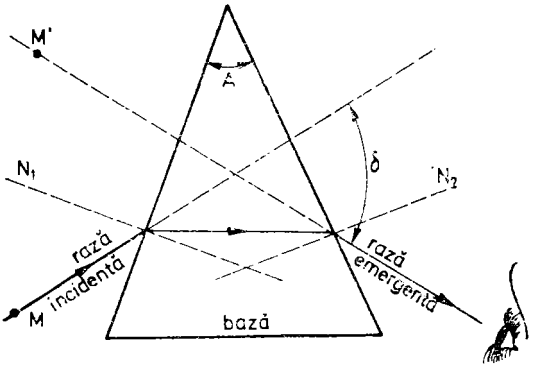


Fig. 17. Mersul unei raze de lumină printr-o prismă optică.

Ştim că dacă îndreptăm spre soare o lentilă convergentă, razele sînt strînse într-un punct numit *focar*. Dacă în punctul respectiv ar fi gămălia unui chibrit aceasta s-ar aprinde. Razele care vin de la soare, din cauza distanţei mari, sînt paralele între ele. Invers, dacă în focar ar fi izvor de lumină punctual, atunci la ieşirea din lentilă razele ar fi paralele între ele (fig. 18, a, b).

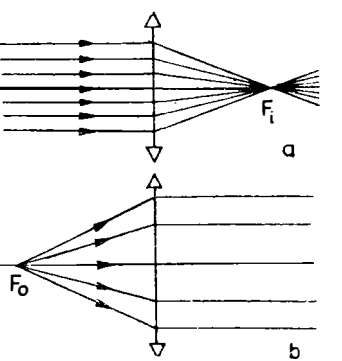
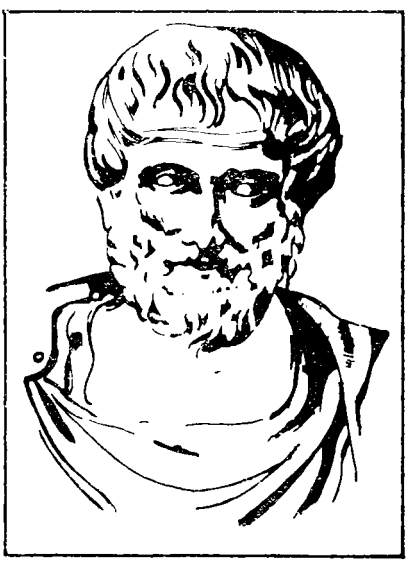


Fig. 18. Comportarea unei lentile convergente faţă de un fascicul de raze paralele avînd direcţia paralelă cu direcţia axei optice principale a unei lentile: a) cazul cînd izvorul de lumină punctual se află la infinit în spaţiul obiect; la ieşirea din lentilă razele sînt concentrate într-un punct de pe axa optică principală, numit *focar principal imagine*; b) cazul cînd un izvor de lumină punctual se află în *focarul obiect* al lentilei; la ieşirea din lentilă razele sînt paralele între ele şi paralele cu axa optică principală.

Orice lentilă are două focare principale care se găsesc de o parte și de alta a lentilei (focar obiect, F_o, și focar de imagine, F_i).

Cu peste două mii de ani în urmă, marele învățat grec Aristotel observase că atunci cînd într-o cameră întunecată pătrund, printr-un orificiu cît un vîrf de ac, raze de lumină provenind de la o sursă de lumină, se formează pe peretele opus orificiului o imagine neclară a sursei. Explicația fenomenului a fost dată cu mult mai tîrziu.

Aristotel (384—322 î.e.n.) s-a născut în orașul Stagira din nordul Greciei și de aceea i se spunea și Stagiritul. Aristotel a fost apreciat de către Marx ca „cel mai mare gînditor al antichității". Aristotel a înființat vestita școală peripatetică, numită și Lyceum, care reprezenta un veritabil centru de cercetări științifice. Denumirea de peripatetică provine de la cuvîntul peripatein care în-



seamnă a se plimba și este înțeles în sensul obiceiului lui Aristotel de a întreține discuțiile cu discipolii săi plimbîndu-se. El a desfășurat o vastă și multilaterală activitate științifică. În opera sa *Organon* el a făcut o sinteză a tuturor cunoștințelor filozofice în ansamblul lor, cunoștințe acumulate de către greci pînă la sfîrșitul secolului al IV-lea î.e.n., punînd totodată bazele mai multor științe, între care și fizica.

Aristotel a avut o uriașă autoritate, care s-a continuat pînă în evul mediu, cînd filozofia lui a dominat aproape în mod absolut, devenind filozofia bisericii catolice. Această autoritate s-a datorat atît erudiției sale enciclopedice cît și sistemului său de logică, constituit de el.

Celebrul pictor și savant italian Leonardo da Vinci a lăsat printre însemnările sale o explicație a fenomenului formării imaginii în camera obscură pe baza propagării razelor de lumină în linie dreaptă, în medii omogene. Explicația lui Da Vinci este corectă.

Leonardo da Vinci (1452—1519), mare pictor, sculptor și arhitect, om de știință și umanist italian. A fost o personalitate reprezentativă a Renașterii, întruchipînd tipul „omului universal". În pictură, din cauza multiplelor sale preocupări și a exigenței sale meticuloase, a lăsat puține opere. Ca sculptor a realizat statuia ecvestră a lui Francesco Sforza (condotier și duce, întemeietorul familiei Sforza, care a condus ducatul Milano; protector a lui Leonardo da Vinci). A lăsat numeroase schițe și proiecte în domeniul arhitecturii. Este autorul unui celebru *Tratat de pictură*. A avut numeroase preocupări în cele mai diverse domenii. A fost primul care a avut ideea parașutei și a elicopterului și multe altele.

Studiind anatomia ochiului, pe care o și descrie, cercetătorul arab Ibn al Haitham, cunoscut și sub numele de Alhazen, în secolul al XI-lea, a ajuns la concluzia că razele de lumină vin la ochi, nu pleacă de la ochi cum credeau înaintașii săi. După schema de funcționare a ochiului (fig. 19, a și b) și a camerei obscure (fig. 20) s-a ajuns la construcția aparatului fotografic de azi. Rolul obiectivului aparatelor fotografice este acela de a reduce dimensiunile aparatului și a face să ajungă mai multă lumină pe film. Obiectivul fotografic are atașat o diafragmă reglabilă. Cu cît diafragma este mai mică, imaginea subiectului fotografiat este mai clară; timpul de expunere însă este mai lung, deoarece pătrunde mai puțină lumină în aparat. Prin fotografiere obișnuită, cu orice aparat fotografic, se obțin imagini plane chiar dacă subiectele fotografiate sînt în trei dimensiuni. Totuși noi avem senzația de profunzime și putem să stabilim pozițiile subiectului, grație efectului de perspectivă și alternanțelor umbrelor și luminilor.

Am arătat mai sus asemănarea dintre camera obscură și ochi și că imaginile fotografice sînt plane. Dar și imaginile pe retina ochiului sînt aproximativ într-un plan. Însă datorită faptului că se privește cu doi ochi, simultan, apare senzația de relief. În prezent se obțin fotografii stereoscopice, care, privite cu ajutorul aparatului numit *stereoscop*, dau senzația de relief. Spațiul pe care-l avem la dispoziție nu ne îngăduie să intrăm în

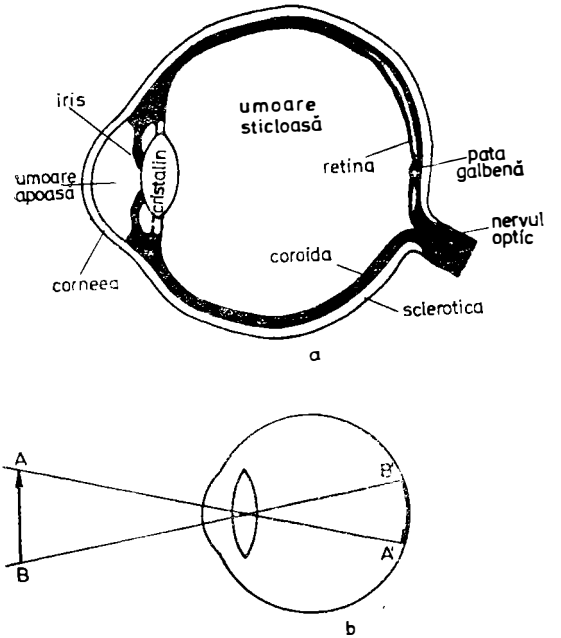


Fig. 19. Ochiul omenesc: a) o secțiune prin ochi și învelișurile principale ale acestuia; b) schema ochiului și formarea imaginii.

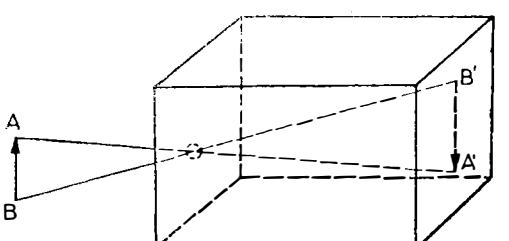


Fig. 20. Schema camerei obscure.

amănunte. Vom adăuga numai că pe film, respectiv pe placa fotografică, se găseşte un strat fotosensibil, de exemplu, din bromură de argint şi gelatină şi că prin procesul de developare se obţine negativul, iar prin copiere pe hîrtie fotografică şi developarea acesteia se obţine pozitivul, adică imaginea finală a subiectului fotografiat. Fotografiile pot fi în alb-negru sau în culori.

Am arătat la începutul acestui capitol în ce constă un atom, din ce este alcătuit. Vom adăuga aici că electronii din învelişul electronic se găsesc repartizaţi pe anumite orbite cărora le corespunde o anumită energie, numită *nivel de energie*. Se obişnuieşte să se spună că electronii sînt repartizaţi în atom pe *nivelele de energie* bine determinate şi că în această situaţie atomul *nu emite radiaţii* (energie). Nivelele de energie din atom sînt denumite *pături electronice* şi sînt notate de specialişti cu literele *K, L, M, N, O, P, Q*. Cea mai apropiată *pătură de nucleu* este pătura *K*, iar cea mai depărtată de nucleu este pătura *Q*. Înseamnă că electronii din pătura *K* sînt mai strîns legaţi de nucleu, ei fiind cei mai apropiaţi de acesta. Aceşti electroni au cea mai mică energie în atom. Teoretic, nivelele de energie (păturile electronice) din atom se reprezintă, în desen, prin linii drepte paralele între ele, ca în figura 21.

Dacă printr-un anumit procedeu electronul ar fi silit să treacă, de exemplu, de pe nivelul 1 pe nivelul

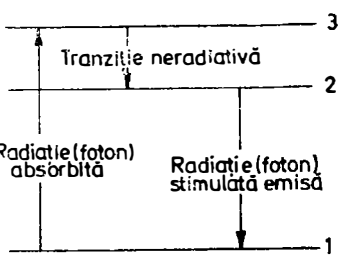


Fig. 21. Reprezentarea schematică a nivelelor de energie în atom.

3, înseamnă că prin procedeul respectiv s-a transmis atomului, din exterior, o anumită energie. Se spune că atomul a trecut pe un *nivel superior de energie* sau că atomul a trecut în *stare excitată.*

Dar pe nivelul 2 sau 3 electronul nu stă decît a suta milioana parte dintr-o secundă; el revine pe nivelul lui, în cazul de faţă nivelul 1. Se spune că atomul trece în *starea lui fundamentală.* Acest salt al electronului de pe nivelul 2, sau 3 pe nivelul 1 se face cu eliberare de energie radiantă, adică atomul trecînd pe nivelul său fundamental emite energie radiantă, exact egală cu energia pe care a primit-o cînd a trecut în stare excitată.

Sînt însă cazuri cînd de pe nivelul 3 de energie, electronul nu sare direct pe nivelul 1 de pe care a sărit pe nivelul 3, ci el trece mai întîi pe nivelul 2, după care, printr-un anumit procedeu, nu spontan, trece apoi pe nivelul 1. Cînd electronul se află pe nivelul 2, în urma saltului de pe nivelul 3, se spune că el se găseşte pe un nivel de energie *metastabil,* iar atomul aflat în această stare se numeşte *atom metastabil.* De reţinut că de pe nivelul metastabil electronul nu poate trece spontan pe nivelul fundamental, emiţînd radiaţie electromagnetică sau emiţînd un foton. (Fotonii sînt particule de lumină care au numai masă de mişcare; masa lor în repaus este nulă. Deci ei nu există decît în mişcare şi sînt însoţiţi de o undă electromagnetică. De aceea, se obişnuieşte a se spune: frecvenţa undelor sau frecvenţa fotonului.) Există totuşi şi cazuri cînd saltul de pe nivelul metastabil pe nivelul fundamental se face spontan, dar sînt extrem de rare.

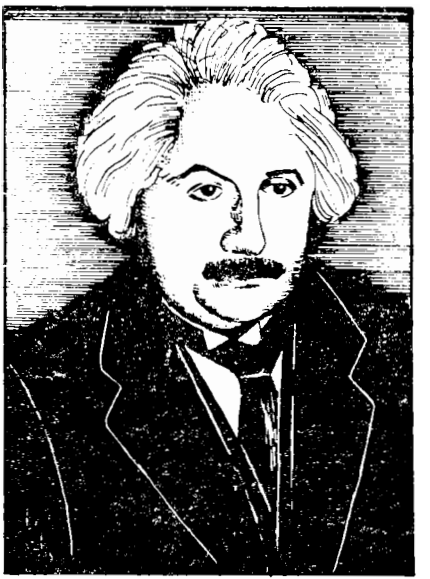
Să vedem acum care sînt procedeele prin care un atom poate trece de pe nivelul matastabil pe nivelul de energie fundamental. De fapt vom descrie un singur procedeu şi anume acela care ne interesează acum. Înspre atomul metastabil se trimite o undă electromagnetică, numită *undă semnal* (foton semnal), care să aibă o frec-

venţă corespunzătoare radiaţiei ce ar emite-o atomul atunci cînd ar trece de pe nivelul 2 pe nivelul 1. Vom nota această frecvenţă cu $f_{2,1}$. Această radiaţie sileşte electronul să treacă de pe nivelul metastabil (nivelul 2) pe nivelul fundamental (nivelul 1). Dar, sărind pe nivelul 1, electronul eliberează energie radiantă, adică radiaţie electromagnetică (un foton) cu lungimea de undă λ_1 şi frecvenţa $f_{2,1}$. Această radiaţie emisă de atomul metastabil este o *radiaţie stimulată* şi ea este în fază cu radiaţia (unda) semnal. Se spune că *atomul a emis stimulat* (de către radiaţia semnal). Emisia stimulată de radiaţii a fost prevăzută, teoretic, de fizicianul Albert Einstein în anul 1917. Dar, descoperirea şi utilizarea ei pentru amplificarea undelor electromagnetice sau pentru generarea oscilaţiilor electromagnetice a avut loc cu mult mai tîrziu, după anul 1958, şi au condus la apariţia laserilor (mai întîi a maserilor[1], apoi a laserilor şi, în fine, a iraserilor[2]).

Albert Einstein (1879—1955), fizician german, emigrat din Germania în 1933 şi stabilit în S.U.A., în 1940. De numele lui Einstein este legată îndeosebi teoria relativităţii restrînse şi teoria relativităţii generalizate. Dar Einstein a făcut mult mai mult pentru fizică. Astfel în anul 1905, cînd a publicat teoria relativităţii restrînse, a mai publicat o lucrare în care arată că radiaţiile, inclusiv cele luminoase, au structură corpusculară, corpusculii fiind numiţi mai tîrziu *fotoni*. Fotonii au numai masă de mişcare, masa de repaus fiind nulă. Aşadar, lumina este de natură electromagnetică, dar are şi structură corpusculară. În acelaşi an, 1905, Einstein a fost întrebat: „Ce este lumina: undă sau corpuscul?" Einstein a răspuns: „De ce nu *şi*?". În anul 1924, Louis de Broglie face o corelare între undă şi corpuscul, arătînd că orice particulă este însoţită în mişcarea sa de către o undă asociată. Einstein a dat teoria mişcării browniene şi teoria efectului fotoelectric.

[1] Maserii funcţionează în domeniul microundelor electromagnetice.

[2] Iraserii funcţionează în domeniul infraroşu din gama undelor electromagnetice.



În anul 1921 a primit Premiul Nobel pentru fizică, pentru efectul fotoelectric și pentru lucrările lui în fizica teoretică.

Laserii sînt instalații pentru generarea și amplificarea radiațiilor electromagnetice din domeniul vizibil al spectrului. Cuvîntul laser provine de la inițialele cuvintelor în limba engleză: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", care înseamnă „Amplificarea luminii prin emisie stimulată de radiație". Radiația emisă de un laser face parte din domeniul optic, în gama undelor electromagnetice (v. fig. 12, b), și se folosește în tehnica holografiei. De aceea, această tehnică a început să se dezvolte abia după anul 1964, cu toate că bazele ei fuseseră puse din anul 1948, adică după apariția laserilor, deoarece radiația *laser* se bucură de

anumite proprietăţi care sînt necesare înregistrării şi restituirii imaginilor în tehnica holografică, proprietăţi care lipsesc luminii cu care sîntem familiarizaţi. De aceea, în cele cîteva rînduri ce urmează vom arăta pe scurt cum se obţine această radiaţie, adică cum funcţionează un laser, şi care sînt proprietăţile acestei radiaţii.

Laserul despre care vom vorbi este numit *laser cu trei nivele*, iar pentru a înţelege cum ia naştere radiaţia emisă vom descrie mai întîi experienţe simple şi apoi laserul ca atare.

Revenind la atomul descris, cu cele trei nivele ale sale, vom considera acum că pe fiecare nivel de energie se găsesc n electroni şi că numărul acesta de electroni reprezintă „populaţia" nivelului respectiv. Vom avea deci: n_1, n_2 şi n_3, adică populaţiile pe cele trei nivele de energie ale atomului considerat. Să presupunem că un anumit număr de electroni sar de pe nivelul 1 pe nivelul 3, de unde revin pe nivelul 2 şi, folosind o radiaţie electromagnetică-semnal, ei trec pe nivelul 1. Ei bine, numărul de electroni care au sărit de pe nivelul 3 pe nivelul 1, prin nivelul metastabil 2, este egal cu numărul de electroni care au sărit de pe nivelul 1 pe nivelul 3.

De pe nivelul 3 pe nivelul 2 tranziţia se face spontan, iar de pe nivelul 2 pe nivelul 1 se face stimulat. Un atom, un ion[1] sau o moleculă care primeşte o undă electromagnetică-semnal de frecvenţă f, pot să emită radiaţii atît spontan cît şi stimulat eliberînd în acest fel o energie egală cu energia semnalului plus energia de tranziţie.

Concret: printr-un procedeu numit *„pompaj optic"* un electron este forţat să sară de pe nivelul 1 pe nive-

[1] Un ion înseamnă un atom sau o moleculă care a primit sau a cedat unul, doi, sau mai mulţi electroni.

lul 3, absorbind o radiație electromagnetică cu frecvența $f_{1,3}$. Pe acest nivel stă numai a suta miliona parte dintr-o secundă. De pe nivelul 3 electronul trece prin tranziție spontană pe nivelul 2, care reprezintă, așa cum am arătat, un nivel *metastabil.* Această tranziție este neradiativă. Pe acest nivel electronul stă pînă cînd o radiație (undă) electromagnetică-semnal cu frecvența $f_{2,1}$ pătrunde în mediul în care se află atomul (atomii, ionii sau moleculele ce posedă cele trei nivele de energie). Sub acțiunea acestei unde-semnal electronul trece pe nivelul fundamental (nivelul 1), atomul emițînd unda-semnal absorbită plus o undă datorită tranzației de pe nivelul 2 pe nivelul 1, energia electronului micșorîndu-se. Această undă (radiație) reprezintă *radiația* (unda) *stimulată și amplificată;* ea este în fază cu radiația-semnal și poate servi ca radiație-semnal pentru alți atomi, molecule sau ioni. Să arătăm schematic cum o radiație-semnal poate provoca o avalanșă de unde electromagnetice într-un mediu cuantic, mediu în care se găsesc atomii, ionii sau moleculele cu trei nivele energetice, nivelul 2 fiind nivelul metastabil. Unda-semnal U_1 cu frecvența $f_{2,1}$ întîlnește atomul metastabil A_1; în urma interacțiunii, atomul respectiv emite, așa cum am arătat mai sus, o dublă radiație: unda-semnal cu frecvența $f_{2,1}$ plus radiația corespunzătoare tranziției de pe nivelul 2 pe nivelul 1, care este în fază cu radiația U_1 și reprezintă radiația stimulată. Cele două unde emise de atomul A_1 întîlnesc fiecare cîte un atom metastabil și în urma interacțiunii fiecare atom A_2 și, respectiv, A_3 emit unda-semnal plus radiația stimulată. Deci de la fiecare atom pleacă două serii de unde: *unda-semnal și unda stimulată* (fig. 22). Cele patru unde (radiații electromagnetice) întîlnesc fiecare cîte un atom: A_4, A_5, A_6, A_7. După interacțiune, de la fiecare dintre ei pleacă le două radiații: radiația semnal și radiația stimulată. acest fel, rezultă 8 unde electromagnetice care întîl-

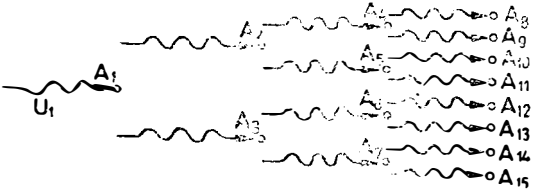


Fig. 22. Cele două serii de unde ce pleacă de la fiecare atom, formîndu-se în scurt timp o avalanşă de unde electromagnetice (de fotoni).

nesc fiecare cîte un atom şi vor rezulta 16 unde ş.a.m.d., încît se produce o avalanşă de unde electromagnetice (de fotoni), într-un timp extrem de scurt. La bază stă, aşa cum am arătat, fenomenul de *emisie stimulată.*

Iar acum să vedem cum funcţionează laserul şi care sînt proprietăţile radiaţiei emise. Primul laser cu mediu solid a fost realizat de către fizicianul şi inginerul american Maiman, mediul folosit fiind un cilindru de *rubin sintetic.* Rubinul natural este o varietate de corindon, adică o substanţă numită de oamenii de ştiinţă oxid natural de aluminiu, care conţine cantităţi mici de alte substanţe denumite *oxizi metalici,* ca oxidul de crom sau oxidul de titan (oxid, în general, înseamnă un compus al oxigenului cu alt element chimic; de exemplu, oxidul de crom înseamnă că oxigenul este compus cu cromul; oxidul de aluminiu înseamnă că oxigenul este compus cu aluminiul ş.a.m.d.). Denumirea de rubin dată oxidului natural de aluminiu se datoreşte culorii sale roşii; *ruber* înseamnă *roşu.* Rubinul are structură cristalină. Rubinul sintetic, care se foloseşte în construcţia laserilor, este un oxid de aluminiu în care s-a introdus, ca impuritate, o cantitate infimă de ioni de crom trivalent. Adică un mic procentaj de ioni de aluminiu (Al^{3+}) a fost înlocuit cu ioni de crom (Cr^{3+}), care ocupă în reţeaua cristalină a oxidului de aluminiu aceleaşi poziţii ca şi ioi de aluminiu pe care i-a înlocuit.

Dacă proporţia de ioni de crom este de 0,05—0,07% atunci culoarea rubinului sintetic este roză, iar dacă proporţia de ioni de crom este de 0,5% culoarea rubinului sintetic este roşie. În prezent se produc la scară industrială cristale de rubin sintetic cu procentaj variabil de crom, printr-un procedeu special în care are loc fuziunea dintre un amestec de pudră de aluminiu şi de oxid de crom la o flacără oxihidrică, cu temperatura de peste 2000 °C, apoi acest amestec este răcit în aşa fel ca să se formeze cristale mari. Rubinele sintetice nu se deosebesc de rubinele naturale decît prin bulele de aer microscopice caracteristice lor, care sînt încorporate în volumul rubinului sintetic. Aceste bule abia se observă la microscoape care au o mare putere de mărire (un mare grosisment). Rubinele sintetice sînt folosite nu numai în construcţia laserilor, ele sînt folosite curent în giuvaergie, ca lagăre („rubine") la ceasornice şi alte instrumente, ca stanţe de efilare a sîrmei ş. a.

Dar pe noi ne interesează rubinele sintetice folosite în construcţia laserilor. Aceste rubine au formă de cilindru (o vergea) cu lungimea de 20—100 mm şi diametrul (grosimea) de 5—10 mm. Feţele terminale (bazele cilindrului) sînt prelucrate cu maximum de precizie, aceste feţe trebuind să fie riguros paralele între ele şi perfect plane. Feţele terminale sînt acoperite apoi cu un strat extrem de subţire de argint sau de aur, dar aşa fel încît una dintre feţe să fie complet opacă, iar cealaltă slab transparentă (transparenţă 4%). Feţele trebuie să fie riguros perpendiculare pe axa cilindrului.

Şi acum să arătăm cum funcţionează laserul. Să considerăm un cilindru de rubin, aşa cum a fost descris mai sus, dar cu ambele feţe terminale A şi B (fig. 23) parţial transparente. Asupra acestui cilindru trimitem simultan două feluri de radiaţie electromagnetică: U_1, cu lungimea de undă de 560 nm (se citeşte nanometri; 1 nm$=10^{-9}$ m$=0{,}000\,000\,001$ m adică a miliarda parte

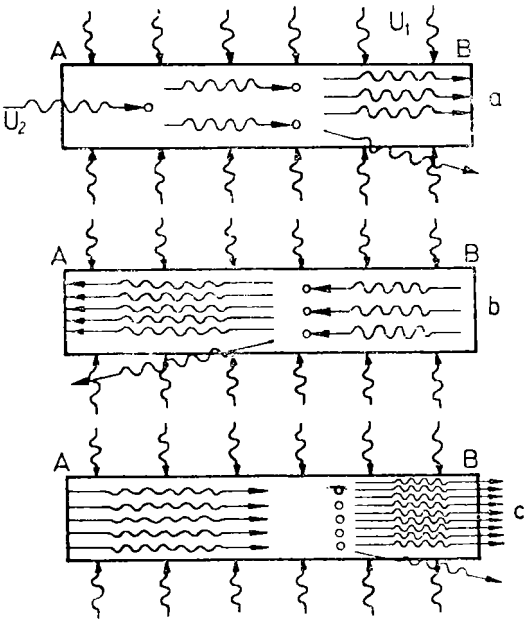


Fig. 23. Cilindrul de rubin cu ambele feţe parţial transparente şi explicarea pompajului optic.

dintr-un metru). Această radiaţie are culoarea verde şi pătrunde în rubin, lateral. Cealaltă radiaţie electromagnetică, U_2, este roşie, are lungimea de undă de 694,5 nm şi este egală cu lungimea de undă pe care ar emite-o spontan atomii metastabili din rubin prin emisie spontană. Radiaţia U_2 se trimite în rubin prin faţa A sau B; în figura 23, a radiaţia se trimite prin faţa A. U_1 reprezintă radiaţia sub acţiunea căreia ionii de crom trec de pe nivelul fundamental pe nivelul 3 (atomii de crom au trei nivele de energie). Astfel, pe nivelul 3 se vor găsi mai mulţi electroni decît pe nivelul 2 sau 1. În acest fel,

s-a realizat o *inversie de populație* a nivelelor de energie, iar procedeul folosit se numește *pompaj optic*.

„*Pompajul optic*" a fost imaginat și introdus de către fizicianul Kastler, pentru a se putea explica fenomenul inversiei populației nivelelor în atomi.

Alfred Kastler (n. 1902), fizician francez, profesor universitar la Sorbona. Are lucrări în domeniul spectroscopiei și a introdus noțiunea de pompajul optic. A primit Premiul Nobel în anul 1966, pentru lucrările: „Studiul pompajului optic și a spectroscopiei hertziene".

Pe nivelul 3 electronii stau numai a suta milioana parte dintr-o secundă, după care ei sar pe nivelul 2, fără să emită radiații electromagnetice, adică electronii trec pe nivelul metastabil. În acest fel, numărul de ioni metastabili devine mai mare decît numărul de ioni care se găsesc în starea fundamentală. E firesc să ne întrebăm de ce cînd are loc tranziția de pe nivelul 3 pe nivelul 2 ionii de crom nu emit radiație. Explicația constă în aceea că ionii de crom interacționează cu rețeaua cristalină a rubinului și în urma acestei interacțiuni cedează rețelei surplusul de energie corespunzător trecerii de pe nivelul 3 pe nivelul 2 (ne amintim că nivelului 3 îi corespunde o energie mai mare decît nivelului 2). Radiația U_2 trimisă prin fața A reprezintă radiația-semnal și, sub acțiunea ei, se provoacă avalanșa de radiații electromagnetice (de fotoni secundari), așa cum am arătat mai înainte, radiații emise de ionii metastabili de crom astfel stimulați (trebuie să reținem că pentru a se produce emisia stimulată de radiații este absolut necesară realizarea inversiei de populație). Dar o parte dintre aceste radiații (fotoni secundari) emise de atomii metastabili au direcția lor de propagare paralelă cu axa cilindrului, iar o parte au alte direcții de propagare, putînd evada prin suprafața laterală a cilindrului (prin suprafața prin care am trimis radiația U_1), figura 23. Radiațiile care se propagă paralel cu axa cilindrului,

întîlnind fața *B* se reflectă, propagîndu-se spre fața *A*. În drumul lor însă întîlnesc atomi metastabili, determinîndu-i să sară pe nivelul fundamental, emițînd radiații care se propagă înspre fața *A* unde se reflectă, întorcîndu-se spre fața *B* și întîlnind atomii metastabili îi stimulează să emită radiații care se propagă spre fața *A* ș.a.m.d. Viteza de propagare a radiației între cele două fețe este enorm de mare, aproximativ 200 000 km/s. În cazul descris se produce un fenomen de amplificare a radiației electromagnetice și, de aceea, se spune că laserul lucrează ca *amplificator de radiații.* Aceste radiații amplificate sînt roșii și ies la un moment dat prin fața *B* (fig. 23, c).

Să presupunem acum că asupra unui cilindru de rubin nu mai trimitem radiația verde U_1 (radiația de pompaj), care să determine trecerea ionilor de crom pe nivelul trei și care apoi să treacă pe nivelul metastabil. În aceste condiții un număr foarte mic de ioni metastabili trec spontan pe nivelul fundamental, emițînd radiații roșii. Aceste radiații vor îndeplini rolul radiațiilor trimise prin fața *A*, în cazul anterior, și ele vor întîlni alți ioni metastabili stimulîndu-i, emițînd radiații de asemenea roșii ș.a.m.d., procesul decurgînd ca în cazul precedent. În cazul de față, așa cum am văzut, nu intervine nici o radiație din exterior pentru a provoca emisia stimulată, ca în cazul precedent. De aceea, se spune că în aceste condiții are loc un fenomen de *generare de radiații* și deci laserul funcționează ca *generator de radiații electromagnetice;* în cazul descris, radiații roșii. Dar fasciculul luminos, roșu, care iese prin fața parțial transparentă, nu este emis în mod continuu, ci intermitent, sub forma de impulsuri scurte („fulgere"), durata unui impuls fiind între a milioana parte dintr-o secundă și a mia parte dintr-o secundă. Aceasta se datorește modului de funcționare și anume, emisia stimulată se produce mult mai rapid decît pompajul optic

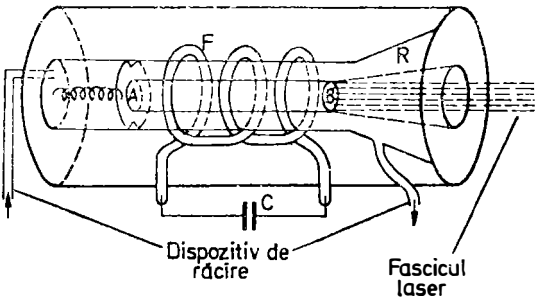


Fig. 24. Schema laserului cu rubin.

şi, de aceea, vor exista intervale de timp în care nivelul metastabil va fi gol; prin urmare, va trebui să treacă un anumit interval de timp pentru ca acest nivel să se umple din nou şi astfel emisia stimulată să se producă, adică să fie emis un impuls luminos (un „fulger" roşu).

Laserul propriu-zis constă dintr-un cilindru de rubin, cu dimensiunile menţionate mai înainte (fig. 24) avînd faţa *A* argintată sau aurită pînă la opacitate completă, iar faţa *B*, argintată sau aurită cu o transparenţă de 4%. Cilindrul este introdus mai întîi într-un tub de răcire, *R*, şi apoi în interiorul unui tub de descărcare în formă de spirală, *F*, care conţine neon, xenon, sau amestec de neon şi cripton. Tubul de descărcare este de tipul „flash", folosit de către fotoreporteri, denumit şi „blitz" (fig. 24). Tubul de descărcare este conectat la un condensator de mare capacitate, alimentat de un acumulator electric (acumulatorul nu este reprezentat pe figură). Întregul ansamblu (cilindru de rubin, dispozitiv de răcire, tub de descărcare în spirală) este introdus într-un cilindru gol cu diametru mare, al cărui perete interior este acoperit cu un strat reflectant. În timpul descărcării electrice prin tubul *F*, se emite şi radiaţia

verde cu lungimea de undă de 560 nm, necesară pompajului optic. Durata descărcării este de 0,000 001 s — 0,0001 s și în acest interval de timp extrem de scurt se produc fenomenele descrise mai sus într-o formă simplificată. Durata unui „fulger" roșu este de 0,000 001 secunde. Sînt și laseri care funcționează cu impulsuri de durată mai scurtă (a miliarda parte dintr-o secundă). De asemenea, s-au construit și laseri cu patru nivele, perfecționate, care au un randament mult mai bun și care prezintă multe avantaje față de laserul cu trei nivele. S-au construit laseri cu gaz (de exemplu, laseri cu bioxid de carbon care folosesc în locul rubinului, bioxidul de carbon). Acești laseri sînt foarte mult utilizați.

Dintre proprietățile radiației laser, care o fac să fie utilizată în holografie vom cita aici următoarele: 1) *coerența;* 2) *monocromaticitatea;* 3) *direcționalitatea;* 4) *intensitatea.*

1. *Coerența.* Așa cum am arătat la momentul respectiv radiația stimulată este în fază cu radiația-semnal; frecvențele ambelor radiații sînt în fază. Cu alte cuvinte, emisia stimulată se produce la rezonanță. Pentru aceste motive se spune că radiația laser este *coerentă.*

2. *Monocromaticitatea.* Cunoaștem cu toții că lumina care vine de la soare este numită, convențional, *lumină albă.* De asemenea, știm că lumina albă este formată din cele șapte culori: roșu, oranj, galben, verde, albastru, indigo și violet (ROGVAIV). Fiecare culoare reprezintă o radiație cu o anumită lungime de undă și se numește *monocromatică. Radiația laser este monocromatică,* adică este o radiație cu o singură lungime de undă (în realitate, lucrurile nu stau exact așa), dar nu în mod riguros. Este de fapt un amestec de radiații cu lungimi de undă foarte apropiate între ele ca valoare. Radiația emisă de un laser cu gaz este cea mai monocromatică.

3. *Direcționalitatea.* Razele de lumină al unui fascicul laser sînt paralele. În cazul surselor clasice de lumină, paralelismul razelor luminoase se obține numai cu ajutorul lentilelor convergente sau al oglinzilor sferice concave, sau, mai bine, al oglinzilor parabolice. În figura 18, b se vede că dacă în focarul *F* se găsește un izvor de lumină punctual (cu dimensiunile liniare mici în comparație cu distanța la care se studiază efectul luminos), la ieșirea din lentilă razele sînt paralele.

4. *Intensitatea.* Fasciculul luminos emis de un laser cu rubin are culoarea roșie. Intensitatea acestui fascicul este extrem de mare în comparație cu radiația roșie emisă de soare, și anume, intensitatea radiației roșii emisă de o suprafață de pe soare de mărime identică cu suprafața transversală a fasciculului laser. Un exemplu numeric: dacă radiația laser ar fi focalizată (strînsă), așa fel ca să se obțină o pată cu diametrul de o sutime de milimetru, atunci temperatura în locul respectiv ar fi de 18 000 °C. Or, la o astfel de temperatură se vaporizează orice material cunoscut (pe suprafața soarelui temperatura este de numai 6 000 °C).

Aplicațiile fasciculului laser sînt extrem de numeroase. Noi nu ne vom ocupa de ele deoarece nu fac obiectul acestei lucrări.

HOLOGRAFIA OPTICĂ ŞI AVANTAJELE EI

Lumina este o undă electromagnetică; ea este caracterizată prin mărimea fizică numită *amplitudine* şi prin mărimea fizică numită *fază* (v. p. 12). Lumina poate fi însă mai intensă sau mai puţin intensă, iar intensitatea ei este direct proporţională cu pătratul amplitudinii.

Cînd se fotografiază un obiect, pe placa fotografică sau pe film se înregistrează intensitatea luminii care provine de la obiectul respectiv. Cum intensitatea este direct proporţională cu pătratul amplitudinii spunem că pe placa fotografică sau pe film se înregistrează amplitudinea luminii. Stratul fotosensibil de pe placă sau de pe film, ca şi retina ochiului, este sensibil la intensitatea luminii şi la culoarea acesteia. Această mărime „transportă" însă numai unele informaţii, unele detalii, de la subiectul fotografiat şi, de aceea, imaginea de pe placă sau film este într-un singur plan şi nu conţine toate detaliile subiectului. Pentru ca pe placa fotografică sau pe film să se înregistreze toate detaliile subiectului, trebuie ca, pe lîngă amplitudine, să fie înregistrată şi faza undei luminoase. Această mărime, faza, dă posibilitatea să se stabilească distanţa dintre obiectele ce ne interesează. Desigur că cititorul îşi dă seama de importanţa acestei mărimi în cazul reconstruirii

imaginilor în relief. O astfel de înregistrare completă a informațiilor despre subiectul fotografiat se realizează prin metode holografice.

Așadar, holografia reprezintă o nouă metodă de obținere a imaginilor fotografice în relief fără a folosi vreun obiectiv fotografic. Prin holografie se înregistrează pe o placă fotografică cele două mărimi caracteristice ale undelor luminoase: *amplitudinea* și *faza;* deci informațiile despre subiectul holografiat sînt complete. Dealtfel, denumirea de holografie derivă de la cuvintele grecești: *holos* care înseamnă *întreg* și *grafein* care înseamnă *scriere.* Denumirea a fost introdusă de către descoperitorul ei, D. Gabor. Placa fotografică conținînd înregistrarea imaginii subiectului holografiat se numește *hologramă.*

Dennis Gabor (n. 1900) fizician englez de origine maghiară. Cercetînd în laboratoarele companiei „Metropolitan Vickers" din Marea Britanie posibilitatea obținerii imaginilor în relief, mai întîi prin îmbunătățirile aduse funcționării microscopului electronic, descoperă în anul 1948 *holografia.* Această descoperire o publică în revista *Nature* în același an. Holografia ca atare a început să se dezvolte după anul 1963, adică după descoperirea *laserilor.*

În anul 1973 îl găsim pe Gabor la Universitatea din Londra, ca profesor de fizică aplicată.

Gabor are cercetări în domeniul teoriei comunicațiilor, teoriei informației, teoriei plasmei. S-a ocupat și cu studiul descărcărilor electrice în gaze, cu studiul oscilografului catodic și al lentilelor magnetice.

În anul 1971, Gabor a primit Premiul Nobel pentru „Tehnica holografiei".

Holografia a fost descoperită de către Dennis Gabor în anul 1948. Dar numai după 5 ani preocupările pentru dezvoltarea holografiei fuseseră abandonate pînă cînd, în anul 1962, fizicianul sovietic Denisiuk preia cercetările îmbinînd holografia cu fotografia în culori, creînd cinematograful panoramic în culori. Un an mai tîrziu, în 1963, interesul cercetărilor pentru holografie

creşte brusc, graţie apariţiei lucrărilor lui Emmett N. Leith şi Juris Upatnicks, care au realizat cu ajutorul unui laser cu heliu-neon o primă hologramă de calitate. Ei lucrau în laboratoarele Universităţii din Michigan. Iată ce spunea creatorul holografiei, Dennis Gabor, despre acest eveniment: „Reuşita lor (a lui Leith şi Upatnicks n.n.) nu se datorează doar descoperirii laserului ci şi, în egală măsură, îndelungatei pregătiri teoretice a problemei de către N. Leith, începută încă din anul 1955. Pe atunci nu ştiusem acest lucru, ca dealtfel întreaga lume, deoarece Leith şi colaboratorii săi, Cutrona, Palermo, Porcello şi Vivian, aplicaseră ideile lor în primul rînd în probleme de «radar lateral», pe atunci secret militar. Acest radar nu este altceva decît un holo-

graf bidimensional de unde electromagnetice, extins prin holografie electronică".

Prin fotografiere obişnuită, aşa cum am mai arătat, se pierde una dintre mărimile caracteristice ale undei luminoase, *faza*, pierzîndu-se astfel o parte din informaţiile despre subiectul fotografiat. Or, prin holografiere, se înregistrează şi faza undei luminoase coerente, provenită de la un laser. Aceasta explică interesul sporit pentru holografie.

Hologramele dau posibilitatea înregistrării mai multor unde succesive în timp, pe o aceeaşi emulsie fotografică. La restituire are loc un fenomen de amplificare a amplitudinii şi fazei. Aceasta constituie o proprietate remarcabilă a hologramelor.

În holografie se folosesc limbajul şi aparatul matematic utilizate în teoria comunicaţiilor.

Să presupunem că privim dintr-un colţ al unei ferestre, afară. Obiectele ne vor apărea cu o anumită dispoziţie faţă de noi în spaţiu. Privind apoi din alt colţ al ferestrei, aceleaşi obiecte vor apărea cu o altă aranjare în spaţiu. Informaţiile de la obiectele de afară trec prin planul ferestrei sub formă de unde luminoase, formîndu-se pe retină o imagine. Dar, în acord cu principiul lui Huygens-Fresnel, informaţiile care au ajuns pe retină, la un moment dat, se pot obţine din informaţiile ajunse de la izvor, la un moment anterior, în alt loc, cum ar fi de exemplu în planul ferestrei. Înseamnă că dacă am putea „îngheţa" informaţiile în planul ferestrei, de pildă pe o placă fotografică, şi am suprima obiectul, am putea vedea obiectul oricînd ca şi cum acesta ar fi prezent. Pentru aceasta ar trebui să dispunem de o metodă care să permită la un moment dat „dezgheţarea" informaţiilor. Aceasta se realizează prin metode holografice. Holografia are la bază principiul lui Huygens-Fresnel şi proprietăţile interferenţei luminii.

CUM SE REALIZEAZĂ O HOLOGRAMĂ OPTICĂ ŞI CUM SE RECONSTRUIEŞTE IMAGINEA OBIECTULUI

Să presupunem acum un obiect, *O*, iluminat de către un laser $\mathcal{L}$, şi un punct *P* în care ajung radiaţiile difractate de obiectul *O* (fig. 25). Fie un plan virtual, *H*, între obiect şi punctul *P*. Putem spune că în *P* ajung radiaţiile ce provin de la planul *H*, sau că în *P* ajung radiaţii de la obiectul *O*, conform principiului Huygens-Fresnel.

Pentru înregistrarea unei holograme este însă absolut necesar să existe, pe lîngă fasciculul luminos difuzat de obiectul a cărui înregistrare dorim să o facem, şi un fascicul coerent şi monocromatic, care constituie aşa-numitul *fond coerent de adiţie* sau *undă de refe-*

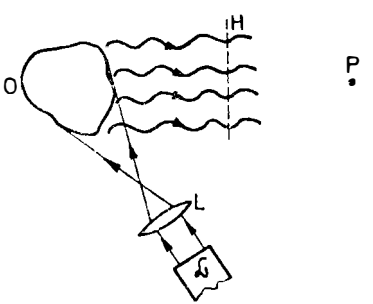


Fig. 25. Cum se aplică principiul lui Huygens-Fresnel în holografie.

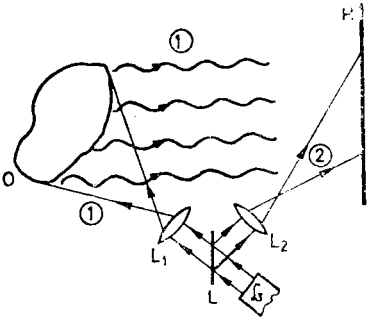


Fig. 26. Schemă ce explică înregistrarea unei holograme.

rință, sau, încă, *purtător*. În figura 26 se arată un montaj cu ajutorul căruia se poate realiza fondul coerent de adiție. Se observă că fasciculul luminos ce provine de la izvorul *L*, care este un laser, este împărțit în două fascicule, (1) și (2), de către lama semitransparentă, *L*. Unda (1) ilumineză obiectul O, iar unda de referință (2) ilumineză direct placa fotografică, *H*. Această undă de referință constituie fondul coerent de adiție, denumit și purtător, așa cum s-a arătat mai sus. Unde de referință (2) interferă cu unda (1) difuzată de obiectul O. Pe placa fotografică, *H*, se înregistrează astfel un fenomen de interferență, concretizat printr-un ansamblu de franje de interferență; această înregistrare reprezintă *holograma*.

Așadar, pentru a înregistra imaginea unui obiect prin holografiere, trebuie să existe obligatoriu două fascicule de lumină: unul provenind de la obiectul ce trebuie holografiat, iar cel de al doilea fascicul poate proveni de la o altă sursă, dar trebuie să fie neapărat un fascicul coerent, deci să provină tot de la un laser.

De exemplu, să zicem că vrem să obținem hologramа unui obiect oarecare, transparent. Putem folosi în acest

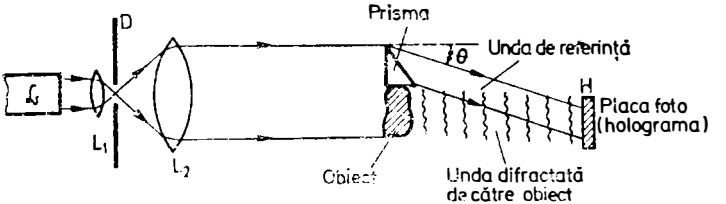


Fig. 27. Schemă ce explică înregistrarea unei holograme a unui obiect transparent.

scop o instalație ca în figura 27. Se observă că fasciculul îngust provenit de la un laser $\mathcal{L}$ trece printr-o lentilă, L_1, o diafragmă, D, și apoi o lentilă, L_2, obținîndu-se la ieșirea din aceasta un fascicul telecentric[1] larg. În calea acestui fascicul se așază obiectul și o prismă. O parte din fascicul trece prin prismă, fiind deviat de către aceasta cu un unghi θ (se citește teta) și constituie fasciculul de referință, care, întîlnindu-se cu fasciculul difractat de obiect, dă naștere la un fenomen de interferență care este înregistrat pe placa fotografică H, care, după developare, constituie hologrma.

Dacă obiectul este opac, se poate folosi o instalație ca în figura 28. Și aici, cu ajutorul lentilei L_2 se obține un fascicul larg de lumină, care, parțial este reflectat de oglinda O și parțial este difuzat de obiect. După înregistrare pe placa fotografică, aceasta se developează, obținîndu-se astfel hologrma.

Se observă în ambele cazuri că pentru înregistrare nu se folosește *obiectivul fotografic.*

În anul 1964 cercetătorii E. N. Leith și J. Upatnicks au elaborat o altă metodă, originală, de înregistrare a hologramelor, folosind un montaj ca în figura 29. Elementul nou în această metodă îl constituie iluminarea difuză a subiectului a cărui hologramă trebuie înre-

[1] Un fascicul telecentric este un fascicul paralel, adică un fascicul ale cărui raze au un punct comun la infinit.

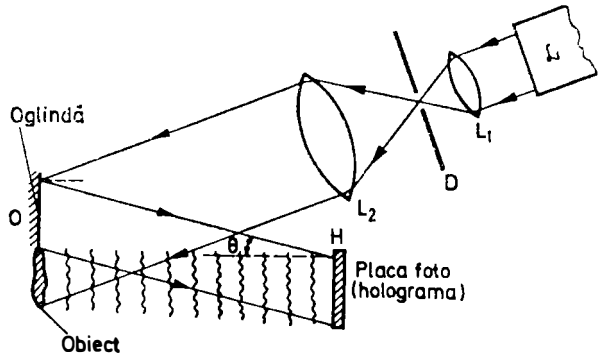


Fig. 28. Înregistrarea hologramei unui obiect opac.

gistrată. Se observă că o parte din fasciculul incident este reflectat de oglinda O_1, apoi de O_2, după care ajunge pe placa fotografică. Cealaltă parte a fasciculului monocromatic este difuzată de către difuzor și apoi străbate obiectul (subiectul) fiind difractată de către acesta; întîlnindu-se apoi cu primul dau naștere fenomenului de interferență, care este înregistrat pe placă (hologramă).

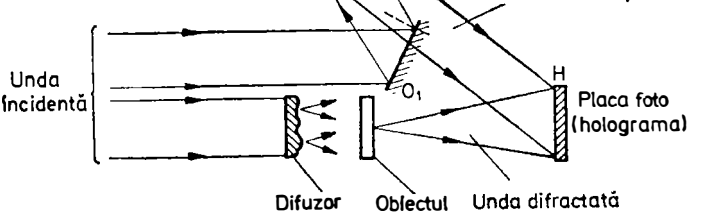


Fig. 29. Un procedeu mai modern de înregistrare a hologramei unui obiect.

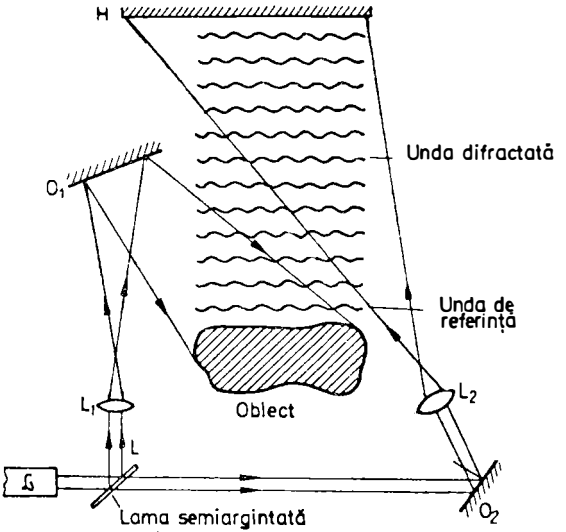


Fig. 30. Un alt procedeu modern de înregistrare a hologramei unui obiect.

În figura 30 se arată un procedeu mai nou de înregistrare a unei holograme. Lumina care vine de la laserul $\mathcal{L}$ este parțial reflectată și parțial transmisă de către lama de sticlă semiargintată, L. Lentilele L_1 și L_2 lărgesc fasciculele de lumină.

Unda de referință și unda difractată de obiect dau naștere la un fenomen de interferență, care se înregistrează pe placa fotografică, H.

Pînă acum ne-am ocupat de înregistrarea hologramelor și am redat montaje simple, dar și montaje mai complicate. Nu am spus însă nimic despre aspectul hologramei, a plăcii fotografice pe care s-a făcut înregistrarea.

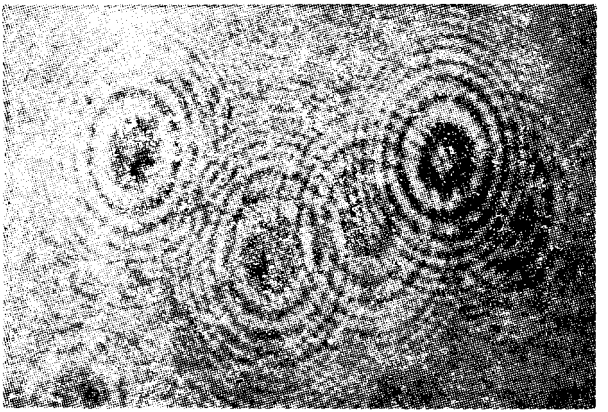


Fig. 31. Aspectul hologramei unor piese de șah.

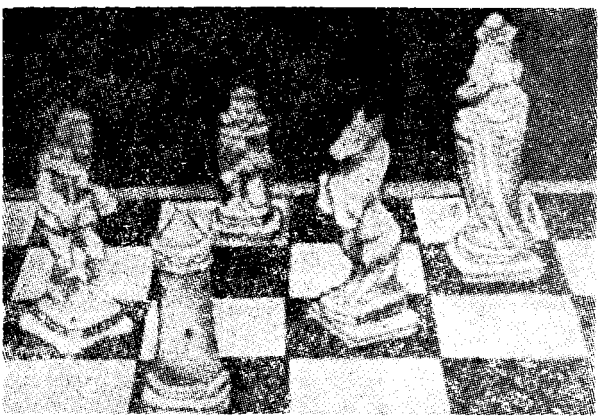


Fig. 32. Piesele de șah înregistrate pe holograma din figura 31.

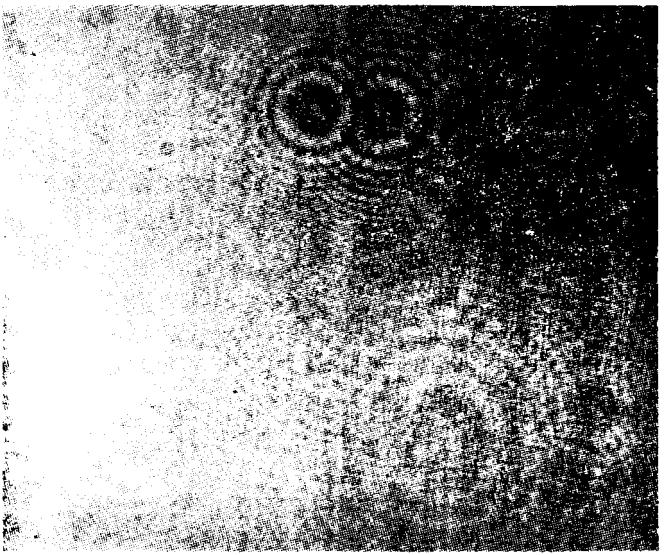


Fig.33. Holograma obiectelor din figurile 31 și 35.

Ca exemplu vom da holograma din figura 31 a pieselor de șah din figura 32. Se vede că holograma nu prezintă nimic vizibil din piesele de șah, ci numai o figură de interferență.

Figura 33 reprezintă holograma imaginilor din figurile 34 și 35. Și aici se vede că holograma nu trădează, pentru ochiul nostru, nimic din ceea ce se vede în figura 34 și 35.

În toate cazurile, după înregistrare, placa fotografică se developează, obținîndu-se holograma. Nu este necesară o nouă operație pentru a se obține pozitivul ca în fotografierea obișnuită, deoarece holograma-pozitiv nu s-ar deosebi de holograma-negativ.

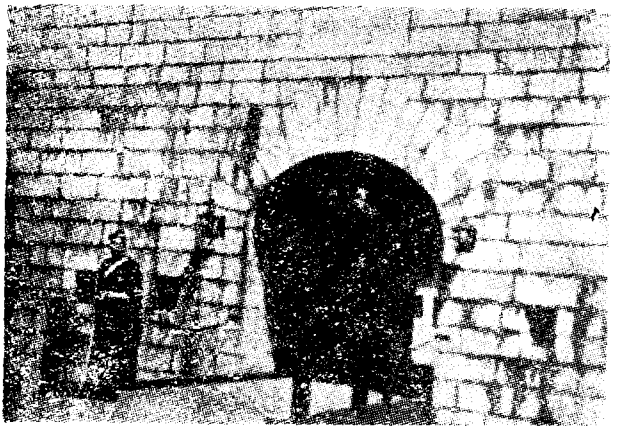


Fig. 34 și 35. Obiectele înregistrate pe holograma din figura 33

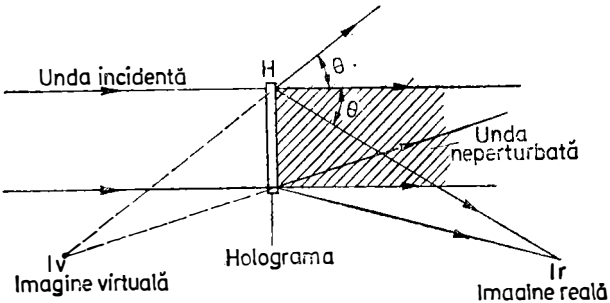


Fig. 36. Schema reconstituirii (reconstruirii) imaginilor înregistrate pe hologramă. Se observă că nu se foloseşte vreun obiectiv fotografic.

Să arătăm acum cum se reconstruieşte (cum se reconstituie) imaginea înregistrată pe hologramă, altfel spus, folosind limbajul de specialitate din tehnica informaţiilor, cum se decodifică informaţiile conţinute codificat în hologramă. Pentru aceasta este suficient ca holograma să fie iluminată cu o lumină provenită de la un laser, fără a folosi lentile, filtre ori alte dispozitive optice, aşa cum este arătat în figura 36.

Se vede că holograma transmite trei unde şi anume: unda restituită direct prin transmisie (partea haşurată), care se propagă pe aceeaşi direcţie cu unda incidentă, însă este slab alterată; o undă deviată în sus, sub un unghi θ, care reprezintă unda difuzată de obiect, atunci cînd s-a făcut holograma; ea dă naştere unei imagini virtuale. Această undă reconstituită este identică cu unda care ar proveni de la obiectul situat în I_v, în lipsa hologramei. Dacă vom deplasa ochiul în interiorul undei reconstituite, în diverse poziţii, vom avea impresii mereu diferite privitoare la poziţiile relative ale punctelor obiectului. Privind cu ambii ochi, înseamnă a privi din două puncte diferite; aceasta repre-

zintă vederea în spațiu, adică imaginea obiectului se vede în trei dimensiuni cu toate proprietățile obiectului: relief, paralaxă și profunzime de cîmp. Figura 32 arată piesele de pe o tablă de șah a căror hologramă este dată în figura 31.

Dar figura 32 reprezintă în același timp imaginea reconstituită[1]. Efectele spațiale se văd clar (aranjamente diferite în spațiu). Reproducerile din figura 32 au fost fotografiate din interiorul undei reconstituite.

A treia undă reconstituită este deviată în jos, sub unghiul θ și, așa cum se vede, este o undă convergentă (cînd unda difuzată de obiect este divergentă). Aceasta formează o imagine reală, I_r, a obiectului, fără intermediul vreunei lentile. Distanța de la această imagine reală pînă la hologramă este absolut egală cu distanța de la obiect la hologramă în timpul înregistrării. Imaginea reală, I_r, poate fi fotografiată fără a folosi vreun sistem optic, fiind suficientă numai o placă fotografică.

În figurile, 37, 38 și 39 se arată efectul profunzimii de cîmp. În figura 37 se vede primul plan clar, iar în figura 38 se observă că primul plan nu este clar, fiind clar numai fundalul. În fine, în figura 39 se observă o claritate perfectă în toate planurile. Nu s-au mai dat și hologramele respective.

Prin procedee obișnuite, neholografice, imaginile se obțin după schema: obiect — undă luminoasă — imagine; prin procedee holografice însă, imaginile se obțin după schema: 1) obiect — undă luminoasă și constituie prima fază; 2) undă luminoasă — imagine și constituie cea de a doua fază a obținerii imaginilor prin tehnica holografică. Foarte important este faptul că aceste două faze pot fi distanțate oricît de mult în timp. Cu alte cuvinte, restituirea poate avea loc oricînd, oricît de tîrziu după înregistrarea hologramei.

---

[1] Imaginea reconstruită este identică cu obiectul și de aceea nu a fost dată de două ori figura 32.

Fig. 37, 38, Efectul profunzimii de cimp.

Fig. 39. Efectul profunzimii de cimp.

Reconstituirea imaginilor, în cazul hologramelor obținute prin metoda indicată de către Leith și Upatnicks (1964), adică a hologramelor obținute cu lumină difuză, se face iluminînd-o tot cu lumină difuză și prezintă marele avantaj că observatorul vede dintr-o dată întreaga imagine a obiectului, datorită faptului că în ochii săi intră razele de lumină care vin de la toate punctele hologramei.

Este important faptul că după orice hologramă originală se pot face copii, acestea din urmă avînd aceleași proprietăți ca și holograma originală. Ceea ce este însă uluitor este faptul că numai cu o porțiune de hologramă se poate reconstitui obiectul în întregime. Se atenuează însă puterea de separare, adică nu se văd suficient de clar toate detaliile imaginii. Evident că în fotografia obișnuită o parte din fotografie nu redă imaginea în întregime. Pentru a obține întreaga imagine a obiectului trebuie să avem toate bucățile de fotografie.

Pe o aceeași placă fotografică se pot înregistra, prin metode holografice, mai multe imagini, fiecare înregistrare făcîndu-se sub un anumit unghi, unghiurile fiind diferite între ele; la reconstituire, fasciculul laser trebuie să ajungă pe hologramă sub același unghi ca la înregistrare. De aici, posibilitatea, aparținînd numai tehnicii holografice, de a stoca informații multiple pe o suprafață relativ mică. Și aici este valabil ceea ce s-a spus mai sus, și anume, că o porțiune de hologramă redă la reconstituire toate informațiile înregistrate. În figura 33 se arată o hologramă reprezentînd înregistrarea celor două subiecte reprezentate în figura 34 și 35. Reconstituite, imaginile sînt identice cu cele din figura 34 și 35 și, de aceea, nu au mai fost reproduse încă o dată.

În cazul hologramelor obținute cu lumină difuză, este mai simplă codarea imaginilor și în același timp mai eficientă decît în celelalte cazuri. Tot referitor la aceste holograme mai menționăm faptul că, deoarece lumina este difuzată uniform pe toată suprafața plăcii fotografice, impuritățile de pe sistemele optice, defecțiunile acestora sau neliniaritatea plăcii fotografice utilizate nu influențează calitatea imaginilor reconstituite. Cele arătate mai sus dovedesc superioritatea netă a holografiei față de fotografia obișnuită.

Imaginile obținute prin metode holografice pot fi mărite, folosind, la reconstituire, o radiație cu lungime de undă mai mare decît lungimea de undă a radiației utilizate la înregistrare. Dacă notăm cu λ_1 și λ_2, $\lambda_2 > \lambda_1$, lungimile de undă folosite la înregistrare și respectiv la reconstituire, atunci mărirea este dată de raportul λ_2/λ_1. S-a rezolvat astfel, prin holografie, problema obținerii imaginilor cu ajutorul microscopului cu radiații X (se știe că pînă în prezent nu se cunosc materiale optice transparente pentru radiațiile Röntgen). În acest fel, prin procedee holografice s-au obținut măriri

(λ_2/λ_1) de 10 000 de ori. Ţinînd seama de faptul că hologramele pot fi mărite şi prin procedee obişnuite, pînă la 100 de ori, rezultă în final măriri ale imaginilor de pînă la 1 000 000 de ori. În acest fel se preconizează construirea unui microscop cu radiaţii X cu însuşiri cu totul remarcabile, cu o putere de rezoluţie de 0,1 nm (nanometri). Pentru comparaţie amintim că cel mai perfecţionat microscop electronic, protonic, sau ionic atinge o putere de separare[1] de 0,8 nm, adică de 8 ori mai mică. Evident, folosind un microscop cu radiaţii X, se vor putea obţine prin holografie imagini ale moleculelor sau ale atomilor.

În microscopia electronică se poate realiza înregistrarea hologramelor cu ajutorul fasciculului de electroni, iar reconstituirea imaginii se poate face cu ajutorul radiaţiei laser. În acest fel, se atinge o putere de separare de 0,15—0,2 nm[2] putîndu-se evidenţia astfel atomii din reţelele cristaline.

---

[1] Prin putere de separare, denumită şi putere de rezoluţie, de rezolvare sau rezolutivă, se înţelege distanţa cea mai mică, liniară sau unghiulară, ce poate să existe între două puncte, ca ele să fie văzute distinct.

[2] Înseamnă că se pot vedea distincte două puncte separate între ele printr-o distanţă de 0,15—0,2 mm.

HOLOGRAFIA ACUSTICĂ

Principiul holografiei optice se aplică şi undelor acustice. Obiectele sînt iradiate cu unde acustice sau unde ultrasonice coerente, în loc de unde luminoase, care pătrund şi în interiorul corpurilor opace, permiţînd astfel să se obţină imagini în trei dimensiuni ale interiorului acestora.

Principiul înregistrării unei holograme acustice este arătat în figura 40. S_1 şi S_2 reprezintă sursele ultrasonice, alimentate de acelaşi generator, sau de două generatoare aflate în fază, O este obiectul a cărui hologramă vrem să o înregistrăm. Undele care pleacă de la S_1 sînt deformate cînd traversează obiectul O, în timp ce undele care pleacă din S_2, nestrăbătînd obiectul, nu sînt deformate. Cele două unde coerente (provenind de la S_1 şi S_2) interferă şi pe placa aparatului fotografic, F, se înregistrează acest fenomen. În cazul în care undele se propagă în interiorul unui lichid, ca în figură, interferenţa lor produce pe suprafaţa lichidului un sistem de riduri. Deformaţia suprafeţei lichidului este, în fiecare punct, proporţională cu intensitatea acustică. În aceste condiţii, suprafaţa lichidului constituie o veritabilă hologramă şi se poate compara cu holograma optică. Suprafaţa lichidului astfel ridată este iluminată de sursa I şi fotografiată (fig. 40). Pe suprafaţă

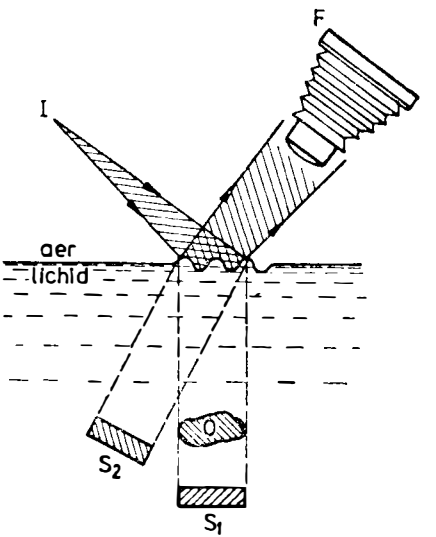


Fig. 40. Schema de înregistrare a unei holograme acustice.

și în fiecare punct al ei intensitatea luminoasă este proporțională cu deformația suprafeței lichidului. După developare, placa fotografică este o veritabilă hologramă optică. Iluminînd hologramă astfel obținută cu ajutorul unui fascicul de lumină coerentă, se obține o imagine în trei dimensiuni a interiorului și exteriorului obiectului. Trebuie să reținem că în acest caz lungimea de undă la reconstituire nu este aceeași ca la înregistrare. La reconstituirea imaginii se folosesc unde luminoase, în timp ce la înregistrare se folosesc *unde ultrasonore.*

De menționat faptul că între înregistrare și reconstituire există un anumit interval de timp, deoarece trebuie developată placa fotografică care va constitui hologramă optică. Înregistrarea și reconstituirea pot avea loc simultan (holografie acustică în timp real) dacă se

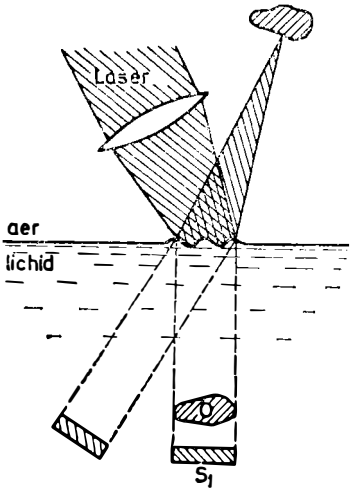


Fig. 41. Obţinerea unei imagini reale şi a unei imagini virtuale în procedeul de holografie acustică.

iluminează suprafaţa lichidului cu un laser în timpul experienţei (fig. 41). În aceste condiţii se observă o imagine reală (cazul din figura 41) şi o imagine virtuală.

În experienţele descrise (v. figurile 40 şi 41) mediul în care se produc unde staţionare este un lichid. Însă holografia acustică se aplică şi cînd mediul este un gaz.

În holografia optică, aşa cum am arătat (v. p. 62), se realizează interferenţa dintre undele difractate de obiect şi o undă de referinţă coerentă. *În holografia acustică* există însă posibilitatea suprimării *undei acustice de referinţă.*

Schema de principiu pentru înregistrare, fără a folosi unda de referinţă, este dată în figura 42, în care O reprezintă obiectul, S_1 este sursa de unde ultrasonore, sursă excitată de către generatorul *G*, *M* este detectorul care poate fi un microfon şi care se găseşte în planul

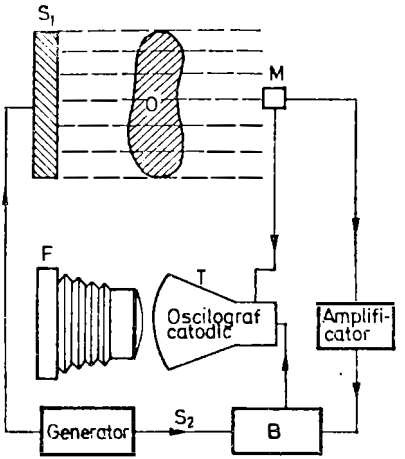


Fig. 42. O altă schemă de înregistrare a unei holograme acustice.

holoramei ce va fi baleiată[1] punct cu punct prin deplasarea detectorului M[2]. Semnalul electric emis de detectorul M este primit în B printr-un amplificator; în B se face suma acestui semnal cu semnalul electric S_2, furnizat direct de generatorul G. Aceasta este suma electrică ce înlocuieşte interferenţa în planul holoramei. Semnalul rezultant modulează fasciculul de electroni dintr-un oscilograf catodic T, poziţia spotului luminos pe ecranul oscilografului fiind legată de poziţia detectorului M. (Oscilograful este un aparat de măsurat şi de observat cu ochiul liber înregistrarea variaţiilor rapide ale unor mărimi electrice ca tensiunea, intensitatea şi care pe ecranul aparatului apar sub forma unor curbe.

[1] Prin operaţia de baleiere se realizează „măturarea" în linie dreaptă a planului holoramei.

[2] Deplasarea ordonată şi periodică pe planul holoramei, a detectorului M.

Acest aparat înregistrează și oscilațiile unor mărimi neelectrice ca presiunea, temperatura ș.a., folosindu-se dispozitivele numite *traductoare*, dispozitive care permit măsurarea mărimilor neelectrice prin măsurări electrice.)

Un aparat fotografic pus la punct pe ecranul osciloscopului catodic permite înregistrarea hologramei optice corespunzător hologramei acustice. Baleiajul trebuie să fie foarte fin pentru o cît mai bună claritate și deci și calitate a imaginii. Această operație nu este însă deloc ușor de realizat. În plus, obiectul O trebuie să rămînă absolut fix în timpul baleiajului. Există posibilitatea de obținere a unui baleiaj destul de rapid, dacă se utilizează un tub de televiziune, și anume, un tub cinescopic al cărui ecran se înlocuiește printr-o lamă de cristal piezoelectric. Cristalul se plasează în planul hologramei și el este baleiat de către fasciculul electronic din tub. Tubul dă o tensiune care este funcție liniară de amplitudinea ultrasunetelor pe care le primește în fiecare punct. Această tensiune modulează intensitatea[1] de emisie secundară produsă de fasciculul de baleiaj. Se adaugă semnalul electric care servește ca referință și, după amplificare, semnalul rezultat este trimis într-un osciloscop catodic pe ecranul căruia se observă imaginea optică a hologramei acustice.

Față de alte metode de formare a imaginilor sonore, holografia acustică prezintă următoarele avantaje: a) se folosesc sisteme optice și electronice foarte bine puse la punct; b) informațiile se pot prelucra pe cale optică sau folosind calculatoarele electronice.

Totuși holografia acustică este limitată datorită particularităților constructive ale detectorilor și uneori chiar

[1] Prin modularea intensității se înțelege variația în timp a intensității corespunzător amplitudinii ultrasunetelor, amplitudine de care depinde tensiunea tubului cinescopic.

datorită obiectelor a căror hologramă trebuie obținută, atunci cînd dimensiunile sînt prea mici în comparație cu puterea de separare a sistemului cu ajutorul căruia se obține holograma.

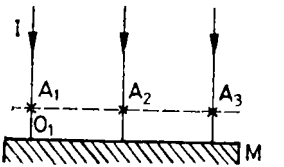
Holografia acustică, așa cum se va arăta în continuare va fi folosită de medici în stabilirea diagnosticului pacienților. De asemenea, va fi folosită în geofizică, în locația submarină, în controlarea nedistructivă a materialelor ș.a.

HOLOGRAFIA ÎN CULORI

Pînă aici s-a vorbit despre realizarea hologramelor în alb-negru atît în optică cît și în acustică. Posibilitățile științei moderne la nivelul actual au făcut posibilă realizarea hologramelor în culori, posibilitate pe care o prezentăm succint în cele ce urmează.

Să considerăm o oglindă plană M (fig. 43) și să trimitem spre ea un fascicul de lumină paralel și monocromatic. (Razele de lumină reprezintă direcțiile de propagare a undelor. În cazul de față, suprafețele de undă sînt planuri paralele între ele și paralele cu suprafața oglinzii.) Undele corespunzătoare razelor reflectate se vor întîlni cu undele corespunzătoare razelor incidente și vor da naștere fenomenului de interferență cu unde staționare. Așa, de pildă, raza $IA_1O_1A_1$, care este reflectată în O_1, interferă în A_1 cu raza incidentă IA_1. Diferența de drum optic dintre aceste raze (dintre undele corespunzătoare acestor raze) este $\Delta = 2\,O_1A_1$, deoarece pînă în punctul A_1 unda incidentă străbate de două ori distanța O_1A_1 : o dată cînd ajunge la oglindă și o dată după reflexia pe oglindă. În cazul în care în A_1 diferența de drum optic este egală cu un multiplu întreg de semilungimi de undă, în punctul respectiv va fi un maxim de lumină (intensitate luminoasă maximă). La fel în punctele A_2, A_3 etc. Toate maximele de lumină

Fig. 43. Pentru punerea în evidență a procedeului de obținere a *undelor staționare.*



sînt situate pe un plan paralel cu suprafața oglinzii *M.* Un astfel de plan corespunzînd unui maxim de lumină este numit *plan ventral* (știm că undele staționare cuprind ventre și noduri și că ventrelor le corespund amplitudini maxime, iar nodurilor amplitudini nule) (v. pag. 25). În punctele în care diferența de drum optic, Δ, este un număr impar de semilungimi de undă, vor fi minime de lumină (intensitate luminoasă nulă). Toate aceste puncte se vor găsi pe un plan paralel cu suprafața oglinzii și deci paralel și cu planul ventral. Un astfel de plan se numește *plan nodal.* Primul plan ventral se găsește la distanța de $\lambda/4$ de suprafața oglinzii, iar primul plan nodal este situat pe suprafața oglinzii. Al doilea plan ventral se află la distanța $3\,\lambda/4$ de suprafața oglinzii, în timp ce al doilea plan nodal se află la distanța $2\,\lambda/4$ de suprafața oglinzii ș.a.m.d. În figura 44, se arată intuitiv dispunerea acestor planuri, ventrale și nodale. Între două planuri ventrale succesive sau între două planuri nodale succesive este o distanță egală cu $\lambda/2$, iar între planuri nodale și planuri ventrale succesive distanța este de $\lambda/4$.

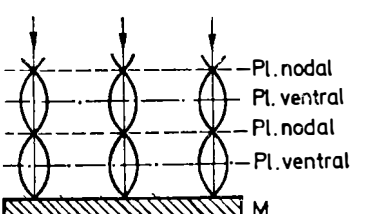


Fig. 44. Formarea *planurilor ventrale* și a *planurilor nodale.*

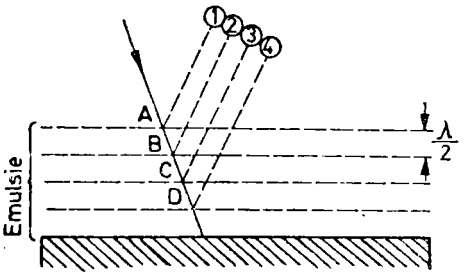


Fig. 45. Argintul redus formează lamele semireflectante distanțate între ele prin $\lambda/2$.

Se modifică experiența în sensul acoperirii oglinzii *M* cu un strat de emulsie fotografică de clorură de argint, cu granulație extrem de fină. Grosimea stratului de emulsie trebuie să fie suficient de mare. Se trimite apoi înspre stratul de emulsie un fascicul de lumină monocromatică de lungime de undă λ, normal pe strat, ca și în experiența precedentă (fig. 44). După o expunere scurtă, bine stabilită, se developează placa fotografică astfel obținută. Privind lateral cu un microscop vom observa o distribuție spațială de straturi înnegrite datorită argintului redus alternînd cu straturi neînnegrite. Primele sînt planuri ventrale și ele se comportă ca niște lamele semireflectante. Celelalte straturi reprezintă planurile nodale și în ele argintul din clorura de argint nu este redus ca în primele, deoarece intensitatea luminoasă în ele a fost nulă.

Să presupunem acum că se trimite înspre placa fotografică un fascicul de lumină albă, care cuprinde și radiația cu lungimea de undă λ, folosită anterior. Lamelele semireflectante de care vorbeam vor reflecta această radiație și toate razele cu lungimea de undă λ, reflectate, sînt în concordanță de fază (fig. 45). Se va obține de aceea un maxim de lumină reflectată pentru această

lungime de undă și numai pentru aceasta. Pentru o altă lungime de undă, $\lambda' \neq \lambda$, se obțin radiații reflectate care se distrug, astfel încît în final se obține numai radiația reflectată monocromatică de lungime de undă λ, adică radiația cu care inițial a fost impresionată placa. Acest procedeu a fost aplicat în fotografia color pentru întîia oară de către fizicianul francez Lippmann.

Gabriel Lippmann (1845—1921), fizician francez. A fost profesor la Sorbona și membru al Academiei de Științe din Paris. A efectuat cercetări în domeniile: electrocapilaritate, termodinamică și optică. A primit Premiul Nobel în anul 1908 pentru fizică, pentru „Inventarea fotografiei în culori". A mai inventat electrometrul capilar, un galvanometru și un celostat.

Să presupunem că pe o placă fotografică, ca aceea descrisă mai sus, se înregistrează imaginea unui peisaj. După developare se obține în fiecare punct al plăcii un sistem de lamele semireflectante, caracteristice radiațiilor primite de locul respectiv. Privind placa fotografică după developare, prin reflexie, sub incidență normală și în lumină albă, lumina reflectată de fiecare punct al plăcii reproduce culoarea care a impresionat-o. Acest fenomen stă la baza *holografiei în culori.*

În cazul holografiei în culori, vom admite existența în emulsia fotografică a lamelelor semireflectante de interferență dintre unda de la obiect și unda de referință. La înregistrare, emulsia este iluminată, de o parte de unda care vine de la obiect, U, și de cealaltă parte de unda de referință, U_R. În figura 46, se arată cazul în care cele două unde sînt dirijate în sensuri inverse. Lamelele semireflectante produse de undele staționare sînt paralele cu suprafața emulsiei fotografice, așa cum am arătat mai sus la fotografia în culori Lippmann. Distanța dintre două lamele succesive este de $\lambda/2$. La restituire se obține o imagine virtuală dacă se ilumineză hologramă cu o undă U'_R, identică cu U_R, folosită la înregistrare și se privește prin reflexie (fig. 47).

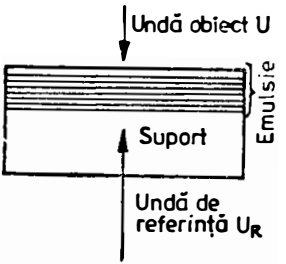


Fig. 46. Cazul în care undele au sensuri opuse.

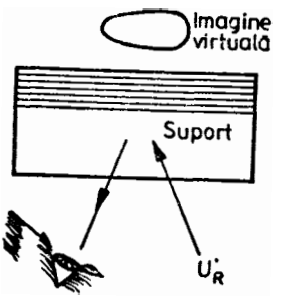


Fig. 47. Obținerea unei imagini virtuale.

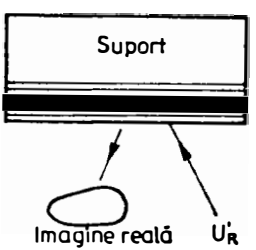


Fig. 48. Obținerea unei imagini reale.

Pentru a observa imaginea reală trebuie iluminată holograma tot cu unda U'_R, dar așa cum arată figura 48, unda U'_R este trimisă nu spre suport (placa propriu-zisă) ci spre emulsie. Se obține o imagine reală prin reflexie.

În toate cazurile arătate aici, dacă la restituire se ilumineză cu lumină albă, imaginea este văzută în culorile corespunzătoare lungimii de undă care a fost utilizată la înregistrare; toate celelalte lungimi de undă sînt distruse prin interferență. În cazul în care la înregistrare obiectul este iluminat cu lumină policromatică, alcătuită din trei lungimi de undă diferite, așa cum a arătat Lippmann, undele staționare corespunzătoare lungimilor de undă diferite pot fi înregistrate pe aceeași emulsie fotografică. La restituire, iluminînd holograma cu lumină albă, se va vedea o imagine în culori și în relief.

În prezent se folosește în holografie și lumina albă, atît la înregistrare cît și la restituire.

Cîteva concluzii asupra holografiei credem că se impun și de aceea le prezentăm mai jos.

1) Tehnica holografiei face posibilă înregistrarea pe materiale fotosensibile, în același timp a amplitudinii și a fazei unei unde optice coerente, informațiile asupra obiectului fiind absolut complete, spre deosebire de tehnica fotografică (fotografierea obișnuită) unde se înregistrează numai amplitudinea și deci o parte din informațiile privind obiectul interesat se pierd. De aceea, se spune că holograma reprezintă un *remarcabil suport de informație.*

2) În tehnica holografică este posibilă însumarea în fază și în amplitudine a mai multor unde coerente înregistrate succesiv în timp. Aceasta face ca holograma să constituie un *veritabil purtător de informații* (pe o întindere mică de material fotosensibil poate fi stocată o multitudine de informații).

3) O porțiune de hologramă este suficientă pentru reconstituirea obiectului sau obiectelor, ceea ce, evident, nu se poate realiza prin fotografierea obișnuită, unde reconstituirea se face numai dacă sînt toate bucățile fotografiei obiectului, respectiv obiectelor.

4) Obținerea imaginilor în tehnica holografică comportă două faze care pot fi distanțate între ele oricît de mult, în timp:

— prima fază: obiect — undă luminoasă coerentă (înregistrare);

— a doua fază: undă luminoasă coerentă — imagine (restituire).

5) În cazul hologramelor obținute cu lumină difuză, impurităţile de pe sistemele optice, defecţiunile acestora, sau neliniaritatea plăcii fotografice nu influenţează calitatea imaginilor reconstituite.

6) Cu ajutorul holografiei acustice se pot obţine imagini ale interiorului subiectelor.

Din aceste cîteva concluzii sistematizate rezultă superioritatea netă a holografiei faţă de fotografie.

La cele de mai sus vom adăuga şi următoarele posibilităţi de utilizare a hologramelor:

7) O hologramă poate fi multiplicată, obţinîndu-se astfel, cópii.

8) Se pot obţine şi holograme ale obiectelor în mişcare.

9) Se pot obţine holograme color.

10) Se pot înregistra holograme folosind lumină albă, de exemplu, lumina care vine de la soare. Cu acelaşi fel de lumină se pot restitui imaginile.

APLICAȚIILE HOLOGRAFIEI

Cunoașterea aplicațiilor holografiei implică mai întîi o prezentare generală și apoi reluarea detaliată a unora dintre ele.

Dintre multiplele aplicații menționăm mai întîi cinematograful în relief, care nu peste multă vreme ar putea intra în exploatare largă; apoi televiziunea holografică. Metodele holografice au permis construirea de spectroscoape holografice fără fantă, realizarea interferometrelor holografice, a cititoarelor optice. De asemenea, cu ajutorul metodelor holografice se pot prelucra date geofizice și seismograme a căror importanță este foarte mare pentru țara noastră, care se află situată pe o falie, din care cauză este încercată de cutremure a căror magnitudine este uneori foarte mare, producînd efecte distrugătoare (de exemplu, cutremurele din 1940 și 1977). Metodele holografice se aplică și la cercetarea calității suprafețelor, la cercetarea distribuției tensiunilor în volumul pieselor transparente. În fine, în prezent s-au obținut holograme care dau posibilitatea obținerii de imagini în relief, folosind ca izvor de lumină soarele, ori alte izvoare obișnuite de lumină albă. În acest scop, s-au folosit procedee speciale, care diferă, evident, de cele descrise mai sus. De asemenea, menționăm că s-a

reuşit să se obţină holograme color, cu ajutorul cărora, la restituire, se obţin imagini în relief şi în culori.

Dar există şi se dezvoltă în aceeaşi măsură holografia sonică şi holografia cu ajutorul undelor de radio. Astfel, au fost create sisteme de „sonoviziune" şi „radioviziune", adică sisteme care folosesc undele acustice şi undele de radio.

Să presupunem că se sondează cu unde acustice apa mării pe toată adîncimea ei. Semnalele reflectate sînt astfel prelucrate încît să se obţină imaginea integrală a fundului marin, în volume şi culori, aşa cum apare el pentru un observator care priveşte fundul mării prin hubloul unui submarin. Superioritatea metodei este evidentă, în comparaţie cu alte metode cunoscute, ca de pildă acelea în care se determină numai distanţele pînă la obstacole, obiecte.

Pentru studierea structurii interne a corpului omenesc se folosesc radiaţiile X. Însă iradierea repetată sau îndelungată a organismului viu cu aceste radiaţii dăunează corpului omenesc. Pentru evitarea acestui mare neajuns se foloseşte „sonoviziunea". „Sonoviziunea" reprezintă o metodă nouă de investigare a organismului omenesc sau a unui corp folosind un aparat denumit *holograf*, utilizîndu-se în acest scop ultrasunetele. Aparatul permite să se descopere cu mai multă uşurinţă tumorile, imaginile acestora fiind date în relief; în acest fel se poate preciza locul şi mărimea acestora, ştiut fiind că ultrasunetele sînt inofensive pentru organismul viu.

Cu prilejul aselenizării navei cosmice „Apollo 15" s-a demonstrat posibilitatea „vederii" la distanţe foarte mari. De pe Pămînt au fost emise unde radio care s-au reflectat de Lună. Cu ajutorul undelor reflectate s-a obţinut o hologramă a suprafeţei lunare. Imaginile date de această hologramă au fost comparate cu imaginile văzute prin telescop şi cu fotografiile făcute de cosmonauţi. În acest fel s-a verificat exactitatea imaginilor

holografice. Se poate spune că holograma obținută a permis „vederea" cu mare exactitate a peisajului lunar.

Holografia reprezintă singurul mijloc de înregistrare instantanee a proceselor volumetrice, ca de exemplu, mișcarea fluxurilor de aer în conducte aerodinamice, ejectarea gazelor din motoarele cu reacție, procesele care însoțesc arderea și explozia.

Metodele holografice permit, între altele, să se determine, de exemplu, diametrul unei picături, diametru ce ar putea fi de cîțiva micrometri, picătură care se deplasează cu o viteză egală cu sau de cîteva ori viteza sunetului în aer. De pildă dimensiunile unei picături ce iese dintr-un pulverizator de apă de colonie, parfum ori fixativ pentru păr, sau pulverizator de aerosoli. Nici o altă metodă, cu excepția celei holografice, nu permite o astfel de determinare. Cum se procedează? Se face holograma jetului de particule ce ies din pulverizator, folosind pentru înregistrare radiația emisă sub formă de impulsuri de 20 sau 30 nanosecunde (reamintim că 1 nanosecundă = 0,000 000 001 secunde, adică a miliarda parte dintr-o secundă) a unui laser cu rubin. Holograma astfel obținută este supusă operației de reconstituire și, cu ajutorul unui microscop, se privește imaginea tridimensională a picăturilor, determinîndu-se apoi dimensiunile transversale ale acestora. Primele determinări după acest procedeu au fost făcute după anul 1965.

Una dintre cele mai importante aplicații industriale ale holografiei o constituie *analiza nedistructivă* a obiectelor. Această metodă de analiză are la bază *interferometria holografică* și a condus la crearea unei mari întreprinderi industriale, prima de acest gen, în statul Michigan din nordul S.U.A.

Pentru a ne da seama de modul în care decurge analiza nedistructivă, vom apela la exemplul următor: să admitem că trebuie făcută analiza unui pneu de autovehicul. Pentru aceasta trebuie făcută holograma pneu-

lui. De o parte și de alta a pneului se așază cîte o oglindă în care se văd părțile laterale. Se face acum holograma pneului. Apoi se trimite spre pneul în cauză un curent de aer cald și pe aceeași placă fotografică se înregistrează holograma în acest caz. Dacă franjele apar pe hologramă dispuse uniform și distanțele între ele egale atunci înseamnă că pneul respectiv a fost umflat uniform și că nu prezintă defecte. În cazul însă că pe hologramă franjele snît altfel dispuse, în comparație cu primul caz, pneul prezintă defecte. Lățimea franjelor este de cîțiva micrometri, suficientă însă pentru a evidenția defectele ce le prezintă pneul.

Printr-un procedeu asemănător, cu o dublă expunere, adică cu dublă holografiere s-a reușit să se obțină imaginea vibrațiilor unei membrane de microfon, a unei chitare sau a unui glonte de armă însoțit de unda de șoc.

S-au mai cercetat, cu ajutorul holografiei, infuzorii existenți într-un milimetru cub de apă murdară.

Fizicianul sovietic Denisiuk combină holografia cu metoda de fotografiere în culori după Lippmann și creează astfel cinematograful panoramic în culori.

Holografia se aplică și la recunoașterea schemelor și a caracterelor. Pe această bază s-a preconizat posibilitatea traducerii unei scrieri oarecare, de exemplu, cuneiformă, într-o limbă cunoscută. S-a reușit ca pe baza unui fotoportret, folosind holografia, să se reproducă semnătura persoanei. De asemenea, s-a reușit ca după semnătură să se alcătuiască fotoportretul.

În prezent se lucrează intens la *holografia panoramică*, preconizată de însuși creatorul holografiei, Dennis Gabor. Se speră să se reușească a se realiza holograme cu profunzime de cîmp pînă la infinit, nu de numai cîțiva metri cum se realizează acum.

Se mai lucrează la realizarea cinematografului în trei dimensiuni și la spectroscopia tridimensională. Dennis

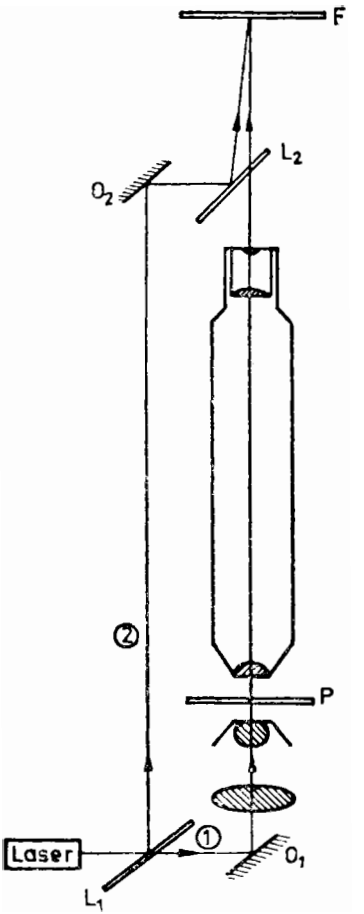
Gabor este foarte optimist în această privinţă. Este convins că realizarea acestora este posibilă. Totuşi există o dificultate în ceea ce priveşte cinematograful tridimensional. Dificultatea constă în aceea că în timpul înregistrării hologramelor, obiectul în mişcare trebuie să se deplaseze pe o distanţă infimă, mai mică decît lungimea de undă a radiaţiei folosită la înregistrare. Această deplasare trebuie să fie cam de a mia parte dintr-un milimetru. Înseamnă că izvorul de lumină, laserul, să se aprindă şi să se întrerupă într-un interval de timp extrem de scurt. O astfel de sursă de lumină s-a realizat. Într-adevăr există laseri cu impulsuri care ilumineaza şi se întrerup într-un interval de timp cît a suta milioana parte dintr-o secundă. Calculul arată că un om ar parcurge în acest timp o distanţă de două sutimi de milioane de metru sau două sutimi de miime de milimetru. Aceasta înseamnă că s-ar putea înregistra şi reconstitui imaginea tridimensională, deci în relief, a unui om în mers normal.

Dar care ar fi avantajul cinematografului în relief pe baza holografiei? Avantajul ar fi că pe aceeaşi placă fotografică s-ar putea înregistra o serie de holograme ale obiectului în mişcare, fiind suficient şi necesar, pentru aceasta, să se modifice de fiecare dată atît la înregistrare cît şi la redare unghiul de incidenţă al fasciculului de referinţă.

Televiziunea holografică este o altă aplicaţie a holografiei şi reprezintă transmiterea de imagini tridimensionale cu ajutorul hologramelor. Marele avantaj constă în faptul că informaţiile transmise pe calea undelor, folosind hologramele, sînt de 300 000 de ori mai multe decît în cazul obişnuit al televiziunii.

Holografia se aplică cu succes în microscopie (fig. 49). Lumina ce pleacă de la laser, întîlneşte lama semiargintată L_1, fasciculul scindîndu-se în două părţi: o parte (1) ajunge pe oglinda O_1 şi, după reflexie, pă-

Fig. 49. Holografia aplicată în microscopie.



trunde prin preparatul ce trebuie holografiat, în microscop, oprindu-se pe placa fotografică *F*. Cea de a doua parte a fasciculului, (*2*), care constituie fasciculul

referință (fondul coerent), întîlnește oglinda O_2, iar ıă reflexie pe aceasta întîlnește lama semiargintată, după această nouă reflexie ajunge la placa *F*. Fasıdele (1) și (2) interferă (de fapt undele corespunɔare acestor raze interferă), înregistrîndu-se pe *F* ɜmul de franje. Placa *F* se developează, obținîndu-se el hologrāma. Apoi hologrāma este proiectată cu un rat special de proiecție, putîndu-se astfel explora umul întreg de imagini înregistrate.

Dacă la proiectare se folosește o radiație cu lune de undă mai mare decît la înregistrare, atunci se ine o mărire a imaginilor. De exemplu, dacă ar exista microscop care să permită înregistrarea hologrameu ajutorul radiațiilor X, atunci falosind la restie radiație cu lungime de undă din spectrul vizibil, ginile ar apărea foarte mult mărite. Într-adevăr, în ul exemplului dat aici, lungimea de undă, λ, pentru iații X fiind de ordinul a 10^{-11} m, iar a radiațiilor domeniul vizibil al spectrului fiind, λ', de ordinul 0^{-7} m, rezultă o mărire: $\lambda'/\lambda = 10\,000$ ori.

Aceasta este însă de domeniul viitorului, deoarece în zent nu există microscoape care să lucreze cu raii X, fiindcă nu există încă piese optice transpate pentru aceste radiații.

În prezent se obțin holograme și cu ajutorul radiaɔr din domeniul invizibil al spectrului.

Deoarece costul laserilor este ridicat, folosirea holomelor este încă limitată. Se preconizează însă ca în ıătorii 10—15 ani, să se perfecționeze și să se ieftiască aparatura necesară obținerii hologramelor, încît stea să fie accesibile chiar fotografilor amatori.

În concluzie, se poate spune că în prezent oamenii știință dispun de o nouă și importantă metodă de liere și cunoaștere a lumii materiale, h o l o g r a f i a.

CUPRINS

ÎN LOC DE PREFAȚĂ .....
CE TREBUIE SĂ ȘTIM DESPRE UNDE .....
CE TREBUIE SĂ ȘTIM DESPRE LUMINĂ .....
HOLOGRAFIA OPTICĂ ȘI AVANTAJALE EI .....
CUM SE REALIZEAZĂ O HOLOGRAMĂ OPTICĂ ȘI CUM SE RECONSTRUIEȘTE IMAGINEA OBIECTULUI .....
HOLOGRAFIA ACUSTICĂ .....
HOLOGRAFIA ÎN CULORI .....
APLICAȚIILE HOLOGRAFIEI

Redactor: VIRGIL SPULBER
Tehnoredactor: CONSTANTIN IORDACHE

Coli de tipar: 3
Tirajul: 19 800 ex.
Bun de tipar: 28.XI.1979
Comanda nr. 76

Republica Socialistă România
Tiparul executat la I. P. Sibiu

„Holografia, un domeniu al fizicii cu totul nou, cu o arie de aplicare din ce în ce mai întinsă și mai impresionantă, nu poate rămîne numai în tratatele sau revistele de specialitate", spun autorii lucrării. În consecință, ei încearcă să apropie un cerc larg de cititori de acest subiect, punînd la îndemînă un material explicit.

Editura științifică și enciclopedică Lei 2,60